

CLARICE DE ANDRADE

**MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL À BASE DE CINZAS DE
MADEIRA, LODO DE ETA E RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CAL**

CURITIBA

2012

MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL À BASE DE CINZAS DE MADEIRA, LODO DE ETA E RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CAL

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: DSc. Vsévolod Mymrine

CURITIBA

2012

Andrade, Clarice de

Materiais para construção civil à base de cinzas de madeira, lodo de eta e resíduos da produção de cal / Clarice de Andadre. – Curitiba, 2012.

55 f. : il.; tabs..

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE.

Orientador: Vsévolod Mymrine

Bibliografia: p.52-55

1. Resíduos vegetais. 2. Resíduos industriais. 3. Construção civil.
I. Mymrine, Vsévolod. II. Título.

CDD 628.4




UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE
Setor de Tecnologia

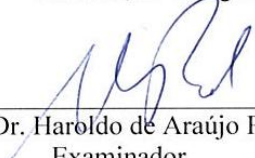
RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos 07 dias do mês de agosto de 2012, na Sala do PIPE - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. Dante Homero Mosca Jr., coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a ducentésima vigésima sétima defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Vsévolod Mymrine (UFPR), Haroldo de Araújo Ponte (UFPR), Khosrow Ghavami (PUC-Rio). Às 9h00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando a candidata **CLARICE DE ANDRADE** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “**MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL À BASE DE CINZAS E DE MADEIRA, LODO DE ETA E RESÍDUOS DE PRODUÇÃO DE CAL**”. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

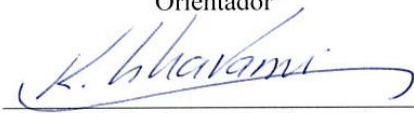
Curitiba, 07 de agosto de 2012.



Prof. Dr. Vsévolod Mymrine
Orientador



Prof. Dr. Haroldo de Araújo Ponte
Examinador



Prof. Dr. Khosrow Ghavami
Examinador

DEDICATÓRIA

A Deus

Aos meus pais e irmãos

Aos meus familiares

Aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a coordenação, professores e funcionários do Programa Interdisciplinar de Pós Graduação em Engenharia - PIPE, pelo empenho, dedicação e toda a atenção dispensada.

Agradeço ao meu orientador Vsévolod Mymrine que muito me ajudou e incentivou em todos os momentos, dividindo comigo seu conhecimento e experiência.

Agradeço ao Prof. Dr. José Manoel dos Reis Neto, Coordenador do LAMIR e sua equipe Rodrigo, Evelin, José, Franciele.

Agradeço ao pessoal do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV da UFPR e da BOSCH, pela cordialidade, presteza e gentileza com que sempre me atendeu e pelas análises realizadas.

Agradeço ao Prof. Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos e a toda a equipe do LTM – Laboratório de tecnologia da Madeira, pela gentileza em permitir que testes fossem ali realizados.

Ao Prof. Dr. José Guilherme Prata pelo apoio e incentivo.

Ao Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva, e todos do LEB – Laboratório de Energia de Biomassa pelo apoio e incentivo.

Aos colegas do PIPE pelas suas colaborações e apoio.

Ao amigo Walderson Klitzke pela força, paciência e atenção.

Ao Prof. Dr. Haroldo Araújo Pontes, pelo uso do Laboratório de Tecnologia Ambiental para a confecção dos corpos-de-prova.

Agradeço aos amigos de sempre e aos de agora pelo apoio e incentivo.

Agradeço a toda minha família que sempre esteve ao meu lado, neste, e em todos os momentos da minha vida.

A todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	viii
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 CINZAS DE MADEIRA	12
2.2 LODO DE ETA	13
2.3 A CAL	16
2.3.1 COMPONENTES DA CAL	18
2.4 RESÍDUOS DE PRODUÇÃO DE CAL (RPC)	19
3 OBJETIVOS DO TRABALHO	21
3.1.1 OBJETIVO GERAL	21
3.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO UNIAXIAL	23
4.2 COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA À ÁGUA (C _A)	24
4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA (A)	24
4.4 DENSIDADE APARENTE (D _A)	25
4.5 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X	25
4.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	25
4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	26
4.8 ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA	26
4.9 PARÂMETROS UTILIZADOS – NORMAS	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5.1 CARACTERIZAÇÃO DE MATÉRIAS PRIMAS	28
5.1.1 TEOR DE UMIDADE	28
5.1.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA – FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)	28
5.1.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	29
5.1.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV	33
5.1.5 GRANULOMETRIA	36
5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS NOVOS MATERIAIS	37
5.2.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	37
5.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA	41
5.2.3 DILATAÇÃO	42
5.2.4 DENSIDADE APARENTE	43
5.2.5 PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS DOS NOVOS MATERIAIS	44
6 CONCLUSÕES	51
7 REFERÊNCIAS	52

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DRX RESÍDUO DE PRODUÇÃO DE CAL	30
FIGURA 2 – DRXCINZAS DE MADEIRA.....	31
FIGURA 3 – DRXDE LETA.....	32
FIGURA 4 - MEV DE PARTÍCULAS DE CINZAS USADA COM DIFERENTES AMPLIAÇÕES	33
FIGURA 5 - MICRO IMAGENS DO LETA ATRAVÉS DO MÉTODO DE MEV	34
FIGURA 6 – MEVDE RESÍDUO DE PRODUÇÃO DE CAL	35
FIGURA 7 – CORPOS DE PROVA FRATURADOS COM PARTÍCULAS DE CINZAS DE MADEIRA VISÍVEIS	37
FIGURA 8 – DIFRATOGRAMA DE DRX DA COMPOSIÇÃO 1 NO 28º DIA	44
FIGURA 9 - MEV – IMAGENS DE FRATURA DE AMOSTRAS DA COMPOSIÇÃO 1 (TABELA 7) NO 28º DIA DE CURA.....	47
FIGURA 10 - MEV - IMAGENS DE FRATURAS DE AMOSTRAS DA COMPOSIÇÃO 1 (TABELA 7), NO 90º DIA DE CURA.....	48
FIGURA 11 – MEV – IMAGENS DAS FRATURAS DAS AMOSTRAS DA COMPOSIÇÃO 4 (TABELA 8) NO 28º DIA DE CURA.....	49
FIGURA 12 – MEV IMAGENS DAS FRATURAS DE AMOSTRAS DA COMPOSIÇÃO 4 (TABELA 7) NO 90º DIA DE CURA.....	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PRINCIPAIS ELEMENTOS DE COMPOSIÇÃO DO LODO DE ETA	14
TABELA 2. PRODUÇÃO MUNDIAL DE CAL (1000T).	18
TABELA 3- COMPOSIÇÕES FORMADAS COM OS MATERIAIS.....	22
TABELA 4 – RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS MATÉRIAS PRIMAS ATRAVÉS DE FRX	28
TABELA 5- COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ÁREA E DOS PONTOS DE CM (FIGURA 4-A E 4-B).	33
TABELA 6 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ÁREA E PONTOS DE LETA DE FIGURA 5-A E 5-B.	34
TABELA 7 - GRANULOMETRIA DO RPCE CM.....	36
TABELA 8 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL DAS COMPOSIÇÕES AO LONGO DO TEMPO DE CURA.....	37
TABELA 9 – RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL APÓS ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	39
TABELA 10 - % DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	41
TABELA 11 –VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DOS CPS AO LONGO DO TEMPO DE CURA.....	42
TABELA 12 –DENSIDADE APARENTE DAS COMPOSIÇÕES AO LONGO DO TEMPO DE CURA .	43
TABELA 13 – COMPARAÇÃO DOS DIFRATOGRAMAS DE DRX DAS COMPOSIÇÕES 1 E 4 NAS IDADES DE 28 E 90 DIAS	45
TABELA 14- COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS ÁREAS E DOS PONTOS DA FIGURA 9 (MEV)	47
TABELA 15- COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS ÁREAS E DOS PONTOS ATRAVÉS DE EDS.....	48
TABELA 16 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS ÁREAS E DOS PONTOS ATRAVÉS DE EDS	49
TABELA 17 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS ÁREAS E DOS PONTOS ATRAVÉS DE EDS	50

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	- Coeficiente de resistência a água
CM	- Cinzas de madeira
Cp	- corpo-de-prova
Desvpad	- desvio padrão
DRX	- Difração de Raios-X
EDS	- Espectrometria de energia dispersiva
ETA	- Estação de Tratamento de Água
FRX	- Fluorescência de Raios-X
LETA	- Lodo de Estação de tratamento de água
LAMIR	- Laboratório de Análise de Minerais e Rochas
LTA	- Laboratório de Tecnologia Ambiental
LTM	- Laboratório de Tecnologia da Madeira
MEV	- Microscopia eletrônica de varredura
NBR	- Norma brasileira regulamentadora
PIPE	- Programa de Pós-Graduação em Engenharia
PR	- Paraná
tep	- tonelada equivalente de petróleo
RPC	- Resíduo da produção de cal
UFPR	- Universidade Federal do Paraná

RESUMO

Foi desenvolvida uma série de novos materiais para construção civil a base de cinzas de madeira, lodo de estação de tratamento de água e resíduos de produção de cal com propriedades mecânicas que ultrapassam as exigências de algumas NBRs. A resistência à compressão uniaxial cresce com o aumento do teor de ligante, no caso resíduo da produção de cal, e com tempo o de cura. No 3º dia de cura das amostras, os valores de resistência à compressão uniaxial de diferentes composições variaram entre 2,43 e 14,43 MPa e no 90º dia entre 5,14 e 15,38 MPa. Os valores de absorção de água no tempo de cura de 28 dias variaram entre 16,07 e 23,38%, no 90º dia diminuem até 14,51 - 18,70%. Obteve-se coeficiente de resistência à água no valor de 1,0. Altos teores de lodo de estação de tratamento de água (até 55%) praticamente não diminuíram as propriedades mecânicas dos novos materiais. Através de métodos de DRX, MEV e EDS foi determinado que durante a hidratação e tempo de cura das misturas ocorreu destruição parcial de partículas de cinza de madeira e de lodo de ETA no meio alcalino do resíduo de produção de cal com a síntese de novos minerais cristalinos e amorfos, principalmente carbonatos responsáveis pela formação de novas estruturas.

Palavras-chaves: cinzas de madeira; lodo de ETA; resíduos de produção de cal; materiais de construção civil; interação físico-química; formação de estruturas.

ABSTRACT

It developed a series of new materials for construction of the base wood ash, sludge treatment plant and waste water lime production with mechanical properties that exceed the requirements of some NBRS. The uniaxial compressive strength increases with increasing binder content, in case residue of lime production and the curing time. On the 3rd day of curing of the samples, the values of uniaxial compressive strength of different compositions varied between 2,43 and 14,43 MPa on day 90 and between 5,14 and 15,38 MPa. The values of water absorption in curing time of 28 days varied between 16,07 and 23,38% at 90 ° days to decrease from 14,51 to 18,70%. Obtained water resistance coefficient to the value of 1.0. High levels of sludge water treatment plant (up to 55%) hardly diminished the mechanical properties of new materials. By methods XRD, SEM and EDS was determined that during hydration and curing time of the mixture occurred partial destruction of particles of wood ash and WTS in the alkaline medium of the residue from the production of lime to the synthesis of new minerals crystalline and amorphous carbonates mainly responsible for the formation of new structures.

Keywords: wood ashes; WTS; waste lime production; construction materials; physicochemical interaction; structure formation.

1 INTRODUÇÃO

O aumento populacional, a industrialização e o incremento nas atividades foram os principais motivos da multiplicação dos resíduos. O crescimento acelerado das populações implica na expansão da industrialização para atender as novas demandas, o que significa o aumento considerável do volume de resíduos gerados visto que a geração de inservíveis é inerente de todos os processos industriais [1].

As indústrias gradativamente estão buscando novas alternativas para a disposição de seus resíduos sólidos industriais, devido às pressões dos órgãos ambientais ou pelo fato de adquirirem certificações ambientais para se tornarem mais competitivas diante ao mercado [2].

O tratamento de água também é considerado uma indústria, pois, para se obter a água tratada (potável) que é o produto final, gera-se o lodo durante o tratamento. O resíduo gerado neste processo de tratamento é denominado de lodo de estação de tratamento de água (ETA), sendo sua composição química bem diversificada [3].

Atualmente um grande desafio das empresas é o de encontrar alternativas viáveis para destinar os resíduos gerados durante o processo produtivo, que sejam técnica e economicamente viáveis, minimizando ao máximo o impacto ambiental.

O presente trabalho foi dedicado ao desenvolvimento de uma metodologia para utilização de três resíduos: cinzas de madeira, lodo de ETA e resíduo de produção de cal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CINZAS DE MADEIRA

As cinzas são obtidas a partir da combustão da madeira. As cinzas de madeiras (CM) são geradas em vários tipos de caldeiras, onde a queima varia em função da regulagem e eficiência que o equipamento oferece.

Dessa forma, a caracterização média desta CM está condicionada a parâmetros específicos da região geradora do resíduo analisado, como espécie, sítio, idade, etc.

A CM se apresenta na forma sólida, em formatos e dimensões irregulares.

O conteúdo de CM raramente é menor que 0,2% ou maior que 1% do peso seco das madeiras. Especificamente para a madeira do gênero *Eucalyptus*, o teor de CM raramente chega a 1% do seu peso seco. A presença de alguns desses componentes, como o cálcio, o fósforo e o enxofre, em dosagens elevadas, são prejudiciais e até mesmo limitantes, para determinadas finalidades industriais [4]. Segundo o Ministério de Minas e Energia [30], o consumo de lenha no Brasil foi de $8,41 \times 10^7$ toneladas equivalentes de petróleo (tep), e considerando 1% de teor de cinzas isso gerou em torno de $1,2 \times 10^6$ ton de cinzas de madeira.

Foi utilizado a CM com esterco bovino para neutralizar o alumínio trocável do solo. O estudo demonstrou que a CM é mais eficaz que o esterco bovino, reduzindo o teor de Al^{3+} , elevando o pH e neutralizando a acidez do solo [5].

Através de outro estudo em plantios de *Eucalyptus grandis* no intuito de avaliar o efeito da CM sobre o crescimento de povoamentos florestais de *Eucalyptus grandis*, assim como fazer uma avaliação financeira dos custos e benefícios advindos da aplicação desse resíduo industrial, verificou-se que os povoamentos onde a CM foi adicionada, o crescimento das árvores foi 49% superior ao que não recebeu nada, chamado testemunha [6].

Foi realizado estudos utilizando a CM como agente de adsorção de cromo (Cr-VI) após tratamento hidrotérmico alcalino em diferentes tempos e concentrações. A principal vantagem da utilização das CM é que além de reaproveitar um resíduo que não teria mais utilidade, sendo considerado um passivo ambiental, facilita as empresas para que cumpram as legislações vigentes que estão cada vez mais

exigentes. Observou de acordo com os resultados obtidos que a CM após tratamento hidrotérmico alcalino apresentou uma boa capacidade de adsorção de íons de metais pesados, sendo considerada uma técnica eficiente e barata para remoção de íons cromo (VI) de efluentes industriais [7].

Também foi utilizado CM para fabricação de materiais de baixa resistência como tijolos, blocos e pedras da calçada e verificou que a cinza pode ser substituta do cimento em até 35%, apresentando resultados satisfatórios [8].

Em outro estudo formou-se um compósito com serragem e CM para substituição do agregado graúdo no concreto, obtendo resultados de resistência de compressão de 1,2 MPa e absorção de água de 8,7%, sendo considerado resultados satisfatórios para o concreto classificado como leve e não estrutural [9].

Estudos incluindo CM para melhoria do vermicomposto para produção de cebolas verificou-se que a CM tem potencial para aproveitamento no processo de vermicompostagem proporcionando a obtenção de adubo orgânico de alta qualidade nutricional com baixo custo de produção. Ainda segundo o autor a composição básica da CM foi de 0,15% de N, 2,27% de P, 4,41% de K, 20,6% de Ca e 3,07% de Mg [10].

O uso de CM como substituto parcial do cimento Portland é recente e pode contribuir com a redução desse resíduo no meio ambiente e reduzir custo/quantidade do uso de cimento Portland em argamassas e concretos [11].

Ainda os mesmos autores verificaram que embora a CM tivesse bastante teor de sílica (67,20%), o ensaio de resistência a compressão demonstrou uma redução em torno de 7%, na medida em que ocorria o aumento da substituição de cimento por cinzas.

22 LODO DE ETA

Para transformar a água bruta em água potável para consumo humano, a Estação de Tratamento de Água (ETA), no processo de tratamento de água convencional, utilizado na grande maioria dos sistemas de abastecimento produz, na fase de sedimentação e filtração, um resíduo composto basicamente com as características da água bruta, acrescido de hidróxidos de alumínio ou ferro e

carbonatos, que é removido por sedimentação e filtração principalmente nos decantadores, sendo estes resíduos chamados de lodo de ETA (LETA) [12].

No Brasil, existem cerca de 7.500 ETAs, chamadas de convencionais ou tradicionais, que empregam a coagulação/floculação/sedimentação e filtração. Esses sistemas geram rejeitos nos decantadores e nos filtros e os lançam diretamente em cursos d'água, agravando a questão ambiental [13].

O LETA constitui-se de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, tais como: algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, colóides, areias, argila, siltes, cálcio, magnésio, ferro, manganês, etc [2].

Alguns metais como cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, cromo e manganês e, em especial, o alumínio, presentes no LETA, possuem ação tóxica, que podem causar efeitos positivos ou negativos nas técnicas de tratamento, disposição final e, até mesmo, na reutilização destes resíduos.

A quantidade total dos resíduos gerados na ETA, o LETA formado nos decantadores representa de 60 a 95% e que a diferença é formada no processo de filtração. O LETA corresponde a 0,2 a 0,5% do volume total de água tratada [2].

O LETA de sulfato de alumínio tem coloração marrom, com viscosidade e consistência que lembram chocolate líquido, além de apresentar dificuldade para sua sedimentação ou flotação em seu estado natural [14].

Este LETA é basicamente líquido, com o teor de sólidos totais presentes variando entre 1.000 a 40.000 mg/l (0,1 a 4%), sendo 75 a 90% de sólidos suspensos e 20 a 35% de compostos voláteis, apresentando, portanto, uma pequena porção biodegradável que pode ser prontamente oxidável [15].

Foram realizadas análises de LETA e determinaram a composição química de acordo com a Tabela 1 [16;14].

Tabela 1: Principais elementos de composição do LETA

Elementos	Margem et al (2006)	Portella et al (2003)	
	%	Lodo 1 (%)	Lodo 2 (%)
SiO ₂ *	34,27%	14,10	12,75
Al ₂ O ₃ *	47,70%	23,62	20,80
TiO ₂	0,93%	0,35	0,68
Fe ₂ O ₃ *	17,73%	8,39	7,58
MgO	0,45%	0,15	0,42
CaO	0,31%	0,33	0,36

Na ₂ O		<0,02	0,10
K ₂ O	0,34%	0,11	0,27
P ₂ O ₅	1,26%	0,34	0,69
Perda ao fogo		49,01	51,12
Outros elem. não detectados	5,7%	3,60	5,23

Um dos grandes desafios é a busca de alternativas economicamente e tecnicamente viáveis, e ambientalmente vantajosas de destinação final do LETA. A utilização benéfica do LETA pode ser considerada uma oportunidade para aumentar a receita das empresas de saneamento, mas, principalmente, reduzir custos e impactos ambientais associados a este resíduo [12].

Outro autor complementa que a utilização de LETA como matéria – prima pode reduzir a quantidade de recursos naturais utilizados, além de deixar de ocupar espaços em aterro sanitário [2].

O destino final para o LETA é uma das tarefas mais difíceis no tratamento de água, pois envolve transporte e restrições ambientais. Entre as alternativas mais utilizadas de disposição final, são destacadas: lançamento em curso d'água; lançamento no mar; lançamento na rede de esgoto sanitário; lagoa; aplicação no solo; e aterro sanitário [15].

O lançamento direto do LETA nos corpos d'água acarreta no aumento na quantidade de sólidos, provocando assoreamento indesejável do corpo hídrico, mudanças de cor, turbidez e alterações em termos de composição química e DQO [17].

Mesmo sem o conhecimento necessário dos efeitos adversos causados por este procedimento, estima-se que cerca de 2.000 toneladas diárias de sólidos são lançados em coleções de água brasileiras, sem nenhum tratamento (proveniente de 7500 ETAs), este dado alarmante justifica a importância de se discutir e encontrar alternativas para a disposição e o uso benéfico do lodo proveniente das ETAs brasileiras [2].

No Brasil o aterro sanitário também pode ser uma alternativa viável para disposição final dos LETA, principalmente em cidades de pequeno e médio porte, com disponibilidade de áreas economicamente acessíveis. A aplicação dos lodos em aterros é considerada, por muitos, a mais segura no sentido de conter a contaminação ao ambiente [18].

A disposição do LETA em aterros sanitários deve ser a última alternativa a ser considerada, devendo-se primeiramente procurar outra forma para o descarte, mais ambientalmente correta [15].

Em um determinado estudo foi utilizado LETA ainda úmido como substituto da areia em matriz de concreto. Os resultados mostraram que as misturas com tratamentos de até 5% de LETA podem ser aplicadas em situações que vão desde a fabricação de artefatos e blocos até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland. Em relação às misturas com teores acima de 5% a sua utilização é restrita a aplicações em que a trabalhabilidade não é um parâmetro primordial, como contra pisos, calçadas e pavimentos residenciais [19].

Outro estudo incorporou LETA na cerâmica vermelha e verificou que houve diminuição da resistência mecânica e aumento na absorção de água [16].

Foi avaliada a possibilidade de incorporação do LETA em massa cerâmica para produção de tijolos e verificou que em geral, a adição deste material à massa cerâmica piorou suas propriedades, mas os valores obtidos para as propriedades tecnológicas ainda permaneceram dentro dos valores limites aceitáveis para a produção de tijolos, dependendo da temperatura de queima e da concentração na mistura. Os resultados indicaram que o LETA pode ser incorporado à massa cerâmica para produzir material cerâmico num percentual de 10% e para queima a partir de 950 °C [20].

Foi utilizado em outro estudo o LETA na fabricação de blocos cerâmicos verificou que blocos fabricados com 10 % de lodo atenderam as exigências da ABNT e se enquadraram na Classe 15 de resistência à compressão, classe em que se enquadravam 100% dos blocos originalmente fabricados na cerâmica onde realizou os estudos. A adição de 20% de lodo à argila atendeu a legislação, mas os blocos foram enquadrados na Classe 10 de resistência à compressão, inferior ao padrão de produção da Cerâmica. Os blocos com adição de LETA variando entre 30 e 50% não atenderam à legislação [21].

2.3 A CAL

Atualmente a indústria da cal representa um importante papel no desenvolvimento das nações, não só pela multiplicidade de seus usos em uma

economia moderna, mas também pelas suas características, e a rigidez locacional das jazidas, de levar empregos ao interior, mantendo o homem no campo [22].

Os gregos empregavam a cal como aglomerante, o mesmo acontecendo com os etruscos e depois com os romanos. A argamassa era preparada pelo mesmo processo ainda hoje adotado, e que consiste na extinção de pedra cozida e mistura da pasta com areia. Essa técnica continua – aliás, até nossos dias – a ser largamente empregada onde não se pede grande resistência mecânica, e em obras que não estejam sujeitas à ação da água [23].

Na metade do século passado, V. J. Azbe, mestre da ciência e arte de fabricar cal, fazia o seguinte comentário sobre o produto: “A cal participa diariamente de nossa vida, de nossas construções, dos produtos químicos e agrícolas. As atividades e a salubridade das indústrias e das cidades dependem dela em grande parte, de modo que pode ser considerado o mais importante produto químico inorgânico à disposição do homem. O volume de consumo de cal pode ser considerado como índice de desenvolvimento de um Estado” [24].

O conhecimento do cálcio como elemento químico é relativamente recente. Contudo, alguns dos seus compostos são conhecidos desde tempos remotos, pois já os romanos usavam a cal apagada (CaOH - hidróxido de cálcio), a cal hidráulica e a cal viva (CaO - óxido de cálcio) nas construções. O nome do elemento deriva precisamente de *calx*, o nome latim para cal [25].

O compromisso que as obras de engenharia civil têm para o desenvolvimento de construções habitacionais, de obras de grandes estruturas, e de comunicações viárias, na ocupação do seu ainda enorme vazio geográfico, faz com que o universo da cal no Brasil possa pretender a ter a mesma vocação das nações desenvolvidas, orientando-se para a criação de expressivos mercados nos setores da agricultura, construção civil, estabilização de solos, siderurgia, álcalis, tratamento de águas e esgotos, papel e celulose, açúcar, metalurgia do alumínio, vidro, carbureto de cálcio precipitado, produtos alimentícios, couros, inseticidas, borracha, fertilizantes, tijolos, sílica-cal, tintas e petroquímica [22].

Pela multiplicidade de suas aplicações, a cal – virgem e hidratada – está entre os dez produtos de origem mineral de maior consumo mundial. O produto ganha ainda maior expressão quando se conhece o amplo leque de setores industriais e

sociais que dele se utilizam, graças à sua dupla capacidade – reagente químico e aglomerante-ligante [22].

A China lidera o *ranking* da produção mundial de cal, com uma participação de 80% seguida pelos Estados Unidos, que respondem por 9% deste mercado. Apesar da produção de cal brasileira ter crescido 4,8% em 2007, o Brasil teve sua performance comprometida pela crise mundial de 2008, que comprometeu o crescimento da siderurgia, uma das grandes consumidoras da cal.

O Brasil se apresenta como o 5º maior produtor mundial. A Tabela 2 mostra o consumo dos cinco maiores produtores mundiais.

Tabela 2. Produção Mundial de cal (1000t).

Países	2006	Participação (%)	2007	Participação (%)	2008	Participação (%)
China	160.000	78	170.000	79	175.000	80
EUA	21.000	10	20.200	9	19.800	9
Japão	8.900	4	8.900	4	9.000	4
Rússia	8.200	4	8.500	4	8.000	4
Brasil	7.060	3	7.400	3	7.300	3
Total	205.160	100	215.000	100	218.800	100

Fonte: U.S. Geological Survey – MME, 2009.

Neste trabalho a amostra utilizada apresentou quantidade de calcário não queimado acima do limite de 12% permitido pela NBR para usar cal como ligante na construção civil.

A definição pelo seu uso foi baseada em dois itens: suas propriedades aglomerantes e sua disponibilidade em grande quantidade, além, de minimizar seu impacto junto ao meio ambiente.

A relação da quantidade de resíduos gerados, e a estimativa de resíduos da produção de cal com menor teor de calcário são, aproximadamente, 10 ton/mês, e com maior teor de calcário – 20 ton/mês

2.3.1 Componentes da Cal

A produção de cal envolve a calcinação de calcário, lançando grande quantidade de CO₂ na atmosfera. A obtenção de cal ocorre em fornos que transformam a calcita (carbonato de cálcio – CaCO₃) o calcário calcítico,

magnesiano ou dolomítico (dolomita), (carbonato de cálcio e magnésio CaCO_3 MgCO_3) em cal virgem (óxido de cálcio e magnésio – CaO MgO), com posterior hidratação, no caso da cal hidratada (hidróxido de cálcio e magnésio – Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2) [25].

Conforme aparece nas estatísticas mundiais, a cal compreende seis produtos resultantes da calcinação de calcários/calcários, magnesianos/dolomitos – hidratados ou não. Estes produtos são: cal virgem cálcica (óxido de cálcio – CaO), cal hidratada cálcica (hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2), cal virgem dolomítica (óxidos de cálcio e de magnésio – CaO.MgO), cal dolomítica hidratada normal tipo N (hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio – $\text{Ca(OH)}_2.\text{Mg(OH)}_2.\text{MgO}$), cal dolomítica hidratada especial tipo S (hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio – $\text{Ca(OH)}_2.\text{Mg(OH)}_2$), utilizadas em argamassas, os tipos intermediários (classificados como cales magnesianas) das cales cálcicas e dolomíticas e a cal hidráulica utilizada em estruturas.

Cal de calcário puro ou cálcica, com extinção violenta, origina-se a partir da calcinação de calcários dolomíticos, com teores de CaO entre 57 e 64% e entre 36 a 43% de MgO .

Cal dolomítica ou magnesiana, com extinção lenta, obtidas a partir da calcinação de calcários dolomíticos, com teores de CaO entre 57 e 64% e entre 36 a 43% de MgO .

Cal silicosa, contendo pequenas percentagens de sílica, como quartzo ou outros silicatos.

Cal argilosa, cal que contém aditivos argilosos (cal hidráulica natural).

Cal metalúrgica, adicionada à escória, usada em fornos siderúrgicos (alto-fornos).

Cal pozolânica, cal adicionada de cinzas (uso na antiga Roma, cinzas do Vesúvio) [24].

As pastas preparadas com excesso de água fornecem as chamadas natas sendo utilizadas em revestimentos e pinturas; as de cimento são preparadas para a ligação de argamassas e concretos de cimento e para injeções [23].

24 Resíduos de Produção de Cal (RPC)

São resíduos da indústria calcária da produção de cal para construção civil, obtida pela calcinação do calcário, constituído essencialmente de cal e elementos, não calcários (Al_2O_3 - alumina, SiO_2 - sílica, Fe_2O_3 – óxido de ferro, etc.) em quantidade totais maiores do que 12% [26].

Ao incorporar RPC em misturas asfálticas de pavimentação, verificou que as misturas atenderam a exigência mínima de 8KN, e que com a incorporação na mistura do RPC melhorou a resistência em temperaturas elevadas. Os resultados da investigação sugerem que a incorporação do resíduo em misturas de concreto asfáltico melhora algumas das suas propriedades, e que é especialmente vantajoso para utilização em ambientes áridos, tais como Bahrein, onde foi realizada a pesquisa [27].

Noutro estudo foi verificada a inserção de RPC com enchimento de concreto asfáltico e os resultados indicaram que a aplicação de RPC melhora as características de deformação permanentes, rigidez e resistência à fadiga de concreto de asfalto na larga gama de temperaturas. Concluiu-se a partir de resultados de teste diferentes que o RPC pode ser usado como carga mineral e, em especial, pode melhorar significativamente a resistência de concreto asfáltico à deformação permanente a altas temperaturas [28].

Foi estudada a utilização do RPC como agregado mineral nas diversas misturas de argamassa. Os resultados revelaram que a adição de RPC causou uma redução nas propriedades de força e densidade, quando comparado com a mistura de controle. No entanto, os resultados obtidos satisfazem os requisitos mínimos de resistência especificados pelo British Standards, e, portanto, conclui-se que o material pode ser prontamente utilizado para cimento de argamassa de alvenaria [29].

Também foi utilizado RPC como matéria-prima para a fabricação de blocos vazados e verificou que podem ser utilizados na construção de edifícios [30].

Vários pesquisadores no Brasil e no mundo pesquisaram o RPC como ligante em bases de estradas, nas fundações de complexos militares e no desenvolvimento de novos materiais, todos os pesquisadores citados convergem para os mesmos objetivos: obter parâmetros aceitáveis em relação às especificações de engenharia e reutilizar um passivo ambiental de maneira simples e economicamente eficiente [24; 31; 32; 33; 34].

A revisão bibliográfica demonstra que existem vários pesquisadores buscando um melhor aproveitamento para os três componentes aqui utilizados, mas nenhum da mesma forma que o presente trabalho.

3 OBJETIVOS DO TRABALHO

3.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver compósitos à base de cinza de madeira, lodo de ETA e resíduo de produção de cal como novos materiais para construção civil e diminuir impacto dos mesmos ao meio ambiente.

3.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as cinzas de madeira, lodo de ETA e resíduo de produção de cal como os componentes de fabricação de novos materiais para construção civil.
- Desenvolver as novas composições de materiais de construção civil com as propriedades mecânicas dentro de NBRs atuais;
- Pesquisar os processos físico-químicos de interação de componentes durante de cura dos materiais desenvolvidos e determinar suas propriedades mecânicas;
- Desenvolver novos e/ou adaptar tecnologias existentes no processo de fabricação dos materiais obtidos;
- Auxiliar na busca de soluções para os problemas relativos ao meio ambiente pela utilização de resíduos industriais usados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para conseguir os objetivos propostos foi aplicada a metodologia de pesquisa descrita abaixo.

Os materiais utilizados tiveram origens diferentes. A coleta se deu em Curitiba e região metropolitana.

O resíduo de cal é proveniente de uma empresa da cidade de Rio Branco do Sul, PR. O lodo de ETA é proveniente da estação de tratamento de água do Passaúna – Sanepar em Araucária, PR. As cinzas de madeira são provenientes da empresa Trombini S/A, em Curitiba, PR.

Os três materiais foram misturados da forma como recebidos, variando os percentuais de cada um, num total de 10 composições diferentes, conforme apresentado na Tabela 3. Não foi realizado o processo de moagem e secagem preliminar com a finalidade de aproximar-se ao máximo de condições industriais e aumentar a eficiência econômica da produção de materiais a nível industrial.

Tabela 3- Composições formadas com os materiais

Nº	Teor de matérias primas, % de peso		
	Cinzas	LETA	RPC
1	30	45	25
2	20	55	25
3	40	35	25
4	35	45	20
5	25	55	20
6	45	35	20
7	40	45	15
8	30	55	15
9	50	35	15
10	35	55	10

Para a confecção dos corpos de prova os materiais foram pesados em balança eletrônica, depositados em um gral para homogeneização dos componentes com um pistilo. Feito isso, a mistura ficou em repouso por duas horas para depois começar a compactação em prensa hidráulica.

O material foi pesado e colocado em um molde a fim de obter no final, um corpo de prova cilíndrico com medida de 2cm x 2cm. A pressão aplicada nos corpos de prova foi de 15 MPa. Para cada composição, em cada tempo de cura, em cada ensaio foram confeccionados 5 corpos de prova. As médias apresentadas nas tabelas são de 3 corpos de prova.

Foram realizadas análises nos componentes e nos compósitos.

Componentes:

- determinação do teor de umidade, segundo a NBR 15270/2005 [35;36;37] Foi utilizada balança eletrônica, com precisão $\pm 0,01$. Três repetições.
- granulometria, através do peneiramento das amostras em peneiras malha Tyler de 14, 24, 28, 35 e 60 (aberturas conforme norma NBR 3310-1/1997) [38].
- composição química qualitativa através de fluorescência de raios X.

Compósitos:

- absorção de água segundo a NBR 15270/2005 [35;36;37].
- difração de raios-X, nos tempos de cura: 28 e 90 dias para as composições 1 e 4.
- ensaios de resistência mecânica à compressão sem absorção de água nos tempos de cura de 3, 7, 14, 28, 60 e 90 dias e após absorção de água nos seguintes tempos de cura: 28, 60 e 90 dias, sendo realizados no equipamento EMIC, segundo a NBR 5739/94 [38], para todas as composições, aplicando-se uma velocidade de carregamento de 0,5 MPa/s.
- análise de microscopia eletrônica de varredura – MEV, nas fraturas dos compósitos com tempos de cura de 28 e 90 dias nas composições 1 e 4.

4.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

A resistência mecânica à compressão uniaxial está diretamente relacionada à qualidade do material, à sua estrutura interna e ao seu desempenho em termos mecânicos e consequentemente à sua durabilidade. Os resultados encontrados

podem fornecer parâmetros para a viabilidade de aplicação do material na construção civil. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira (LTM) da UFPR, em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL 30.000, com base na NBR 5739/94 [38].

4.2 Coeficiente de resistência à água (C_A)

O coeficiente de resistência à água foi determinado pela equação,

$$C_A = \frac{R_{SAT}}{R_{AMB}} \quad (1)$$

Onde: R_{SAT} é a resistência à compressão uniaxial dos copos de prova saturados após imersão total em água por 24 horas,

R_{AMB} é a resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova em condições ambientes.

4.3 Absorção de água (A)

Os ensaios de absorção de água foram executados em conformidade com a NBR 15270/2005 [35;36;37], a qual utiliza a equação,

$$A = \frac{(M_{SAT} - M_S)}{M_S} \times 100 \quad (2)$$

Onde,

M_{SAT} é a massa do corpo de prova saturado após imersão total em água por 24 horas,

M_S é a massa do corpo de prova seco em estufa a 100 °C por 24 horas.

4.4 DENSIDADE APARENTE (DA)

A densidade aparente é uma propriedade importante no processo cerâmico que esta relacionada com os valores de resistência a flexão das peças, absorção de água e retração linear [16].

A densidade dos corpos de prova foi calculada pela relação $DA = \text{massa do cp} / \text{volume do cp}$.

As medidas para o cálculo do volume foram realizadas com um paquímetro digital para o diâmetro e de um micrômetro para a altura.

$$d = m/v \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (3)$$

4.5 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

O espectrômetro de fluorescência de Raios X é um instrumento que determina quantitativamente os elementos contidos em uma determinada amostra, através da aplicação de raios x na superfície da amostra e posterior análise dos espectros fluorescentes. A preparação das amostras a serem analisadas se deu primeiramente, através da pulverização do material e secagem do mesmo em estufa por aproximadamente 24 horas a uma temperatura média de 100° C. Passada esta fase, o material foi misturado com uma resina, em uma proporção de 7g de material para 1,4g de resina, e prensado em forma de pastilhas que foram analisadas por feixes de raios X no equipamento Philips modelo PW 2400, onde foram obtidas as composições químicas do material.

4.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A técnica de Difração de Raios X foi utilizada para a determinação das fases cristalinas onde estão presentes os elementos químicos. Quando o feixe de Raios X difrata em um cristal desconhecido, a medida do ângulo de difração do raio emergente pode elucidar a distância dos átomos no cristal e, conseqüentemente, a estrutura cristalina.

Através do uso de um dispositivo capaz de detectar os raios difratados, pode-se traçar o desenho da rede cristalina, a forma da estrutura gerada pelo espalhamento que refletiu e difratou os Raios X, gerando o difratograma. Para a preparação das amostras, o material após ter sido seco foi colocado em molde de metal e pressionado manualmente para que possa se obter uma superfície plana.

Feito isso, o material foi posto no aparelho para ser feita a análise.

Para o resíduo lodo primário não foi realizado esta análise devido a grande quantidade de matéria orgânica e a pequena quantidade de estruturas cristalinas, o que poderia ocasionar resultados equivocados.

4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV foi feita para as matérias primas e para fragmentos dos corpos de prova após a queima. Para este ensaio os materiais foram secos em estufa a 100 -110°C por 24 horas e metalizados a vácuo com uma camada de ouro antes de serem analisadas as características morfológicas e químicas das amostras. O microscópio utilizado foi da marca JEOL, modelo JSM-6360 LV e os materiais foram metalizados em um equipamento SCD 030 – BALZERS UNION SL 9496.

4.8 ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA

A Espectrometria de Energia Dispersiva – EDS é uma micro-análise que é realizada em conjunto com o MEV. Quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-x. Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado.

4.9 PARÂMETROS UTILIZADOS – NORMAS

O produto obtido pode ser considerado um compósito [39]. Não há norma regulamentadora específica para avaliação do compósito formado, dessa forma várias normas foram utilizadas para considerar os resultados obtidos.

- NBR 15270/2005 para blocos cerâmicos para alvenaria [35;36;37].
- NBR 5739/1994 para corpos cilíndricos de concreto [38].
- NBR 14974/2003 para blocos de sílico-calcário para alvenaria [41]
- NBR 12118/2011 para blocos vazados de concreto simples para alvenaria [42].

.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DE MATÉRIAS PRIMAS

Os resultados de ensaio de composição química total, mineralógica, de estruturas dos resíduos industriais – Lodo de estação de tratamento de água (LETA), cinzas de madeira (CM) e resíduos da produção de cal (RPC) - usados como os componentes dos materiais desenvolvidos neste projeto são apresentados abaixo.

5.1.1 TEOR DE UMIDADE

Os materiais do compósito apresentaram teores de umidade de $1,77 \pm 0,1\%$ na cinza de madeira e $85,7 \pm 0,2\%$ no LETA. O resíduo de cal não apresentou umidade.

5.1.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA – FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

A composição química das matérias primas é apresentada na tabela 4.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de composição química das matérias primas através de FRX.

ELEMENTO	LODO DE ETA	CINZAS	RESÍDUOS DE PRODUÇÃO DE CAL
	(%)	(%)	(%)
SiO ₂	15,6	45,3	1,9
CaO	0,3	15,0	43,1
Al ₂ O ₃	31,1	13,2	0,2
Fe ₂ O ₃	6,6	7,6	0,4
MgO	0,1	3,2	26,3
K ₂ O	0,2	8,1	0,1
SO ₃	0,8	1,3	<0,1
Na ₂ O		0,3	
TiO ₂	0,3	1,2	<0,1
SrO	<0,1	0,1	<0,1
BaO		0,2	
P ₂ O ₅	0,3	1,9	<0,1
MnO	0,2	1,1	<0,1
ZrO ₂	<0,1	<0,1	
Cl	<0,1	0,2	
Cr			
ZnO	<0,1	<0,1	
Rb ₂ O	<0,1	<0,1	

CuO		<0,1	
CeO ₂	0,1		
V ₂ O ₅	<0,1		
Br	<0,1		
Nb ₂ O ₅	<0,1		
Perda ao fogo	44,49	1,28	27,92
Ni			
Total	100	100	100

Os principais elementos da composição química, definidos por FRX (Tabela 4) de LETA são Al₂O₃ e SiO₂, de CM - SiO₂, CaO, Al₂O₃ e Fe₂O₃ e de RPC – CaO e MgO.

A composição química de LETA apresenta basicamente Al₂O₃ e SiO₂ representando 46,7% e com 6,6% de Fe₂O₃. Existem também relativamente pequenos teores de TiO₂, MnO, CaO, SO₃, Na₂O, K₂O e P₂O₅.

A característica química principal de LETA é o altíssimo valor de perda ao fogo (P.F.) – 44,49%. Este número junto com pequenos teores de CaO e MgO indicam alto teor de materiais orgânicos que pode prejudicar as propriedades mecânicas dos materiais desenvolvidos através de alta troca iônica de Ca e Mg entre LETA e RPC.

Por serem classificados como resíduos não perigosos e inertes, as pesquisas de lixiviação e solubilização não foram executadas.

5.1.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Através de método de DRX foram identificadas as composições mineralógicas de cinzas, lodo de ETA e resíduos da produção de cal.

5.1.3.1 Resíduo de Cal

Estudando a composição mineralógica de RPC (Figura 1 e Tabela 4) através do método de DRX verifica-se a presença dos seguintes minerais: Portlandita - Ca(OH)₂, Periclásio – MgO, Calcita - CaCO₃, Dolomita - (Ca,Mg)CO₃, Carbonato de Cálcio e Magnésio (Ca,Mg)CO₃, Carbetto de Cálcio - CaC₂ e Quartzo - SiO₂.

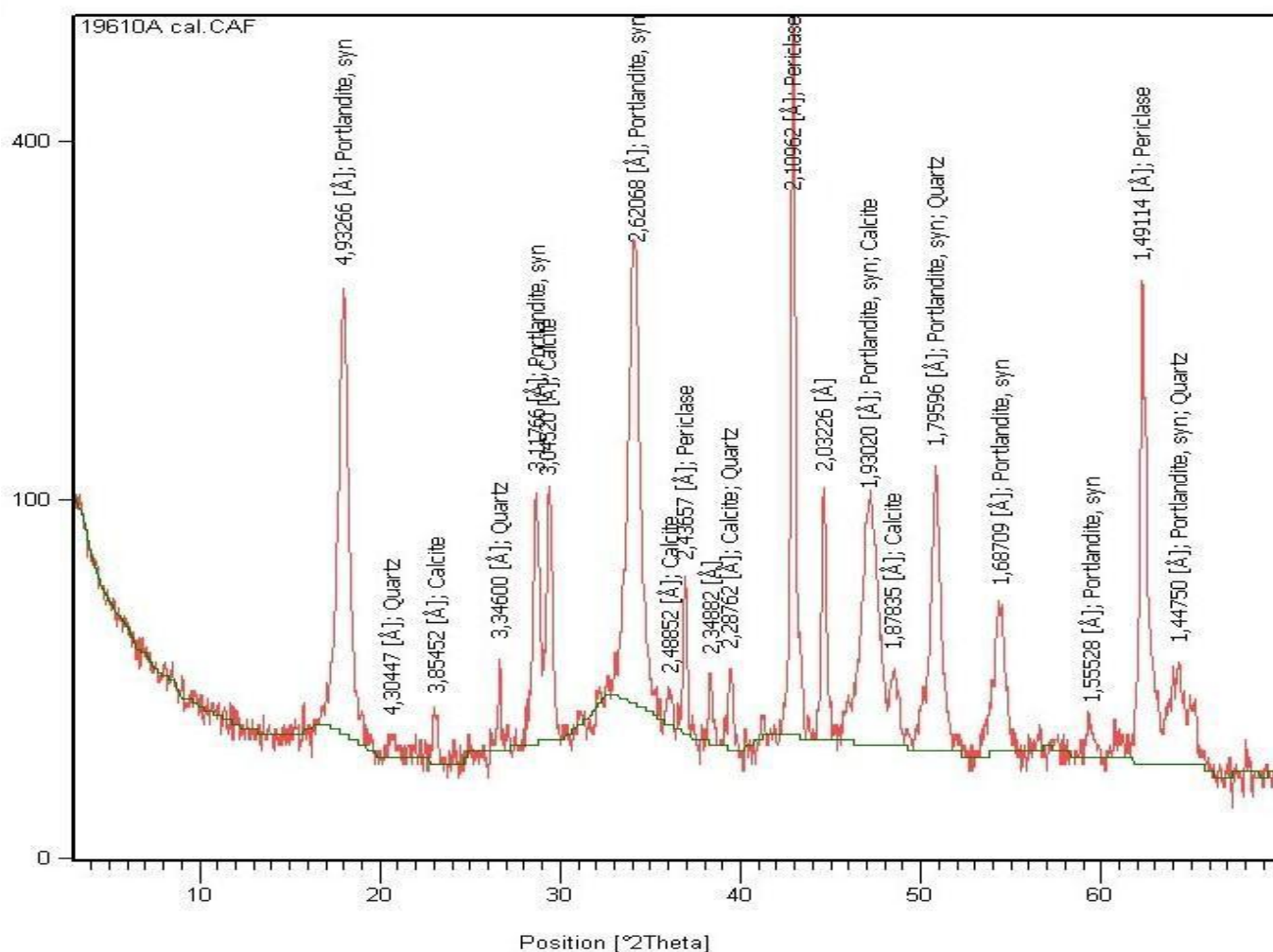


Figura 1 – DRX Resíduo de produção de cal

5.1.3.2 Cinzas

Foi identificada a presença dos seguintes minerais nas cinzas:

Quartzo – (SiO_2), Calcita - CaCO_3 , Dolomita - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, Anquerite - $\text{Ca}_{0,997}\text{Mg}_{0,273}\text{Fe}_{0,676}\text{Mn}_{0,054}(\text{CO}_3)_2$ e Portlandite - $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

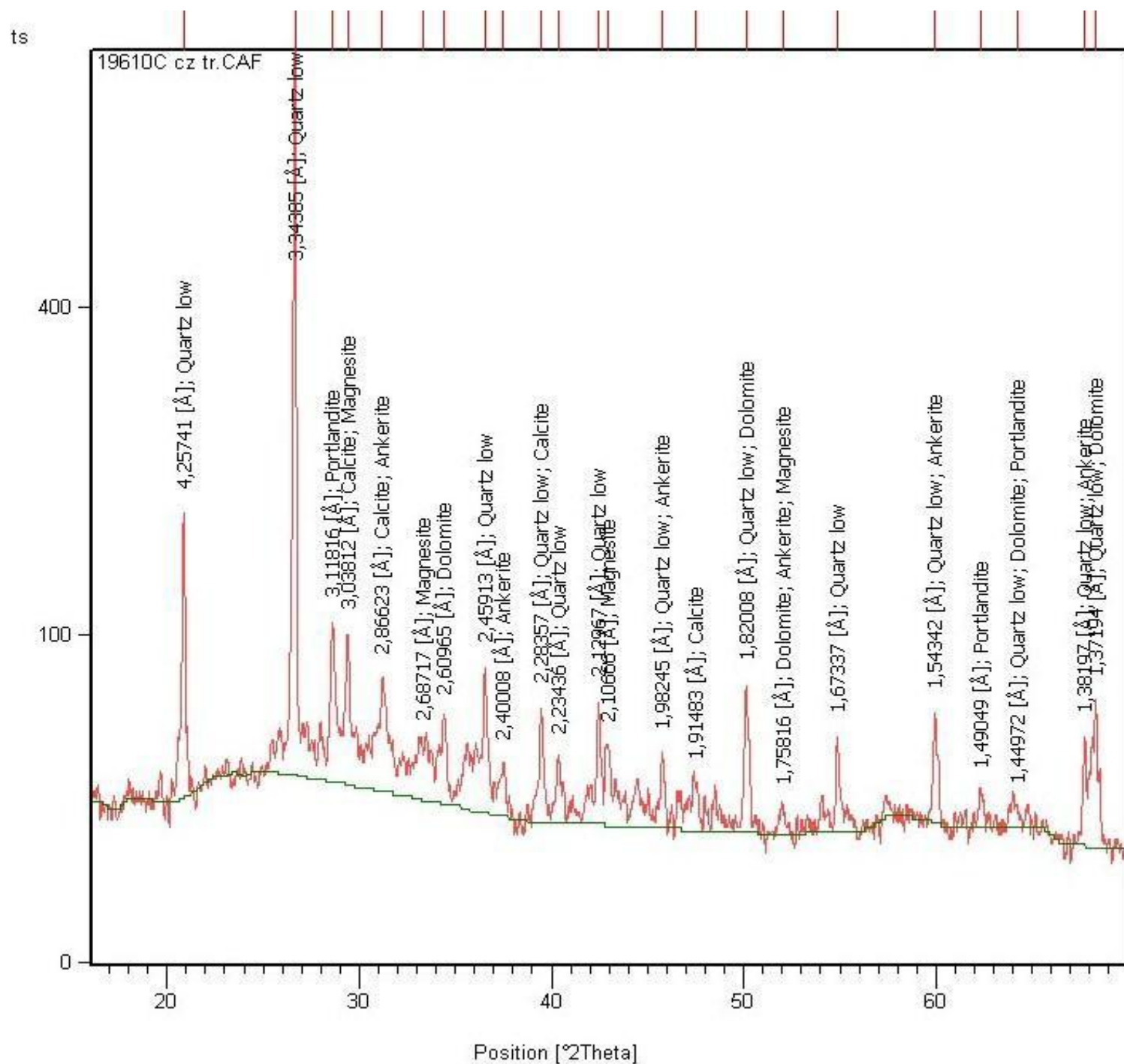


Figura 2 – DRX Cinzas de madeira

5.1.3.3 Lodo de ETA

Através da utilização do método de RXD foram pesquisadas as fases minerais presentes no LETA, que apresentou três fases semelhantes das argilas, como pode ser observado pela presença dos seguintes minerais:

Quartzo - SiO_2 , Kaolinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, Illite – $\text{Al}(\text{OH})_2(\text{SiAl})_2\text{O}_5\text{K}(\text{H}_2\text{O})$ e a Gibbsita – $\text{Al}(\text{OH})_3$.

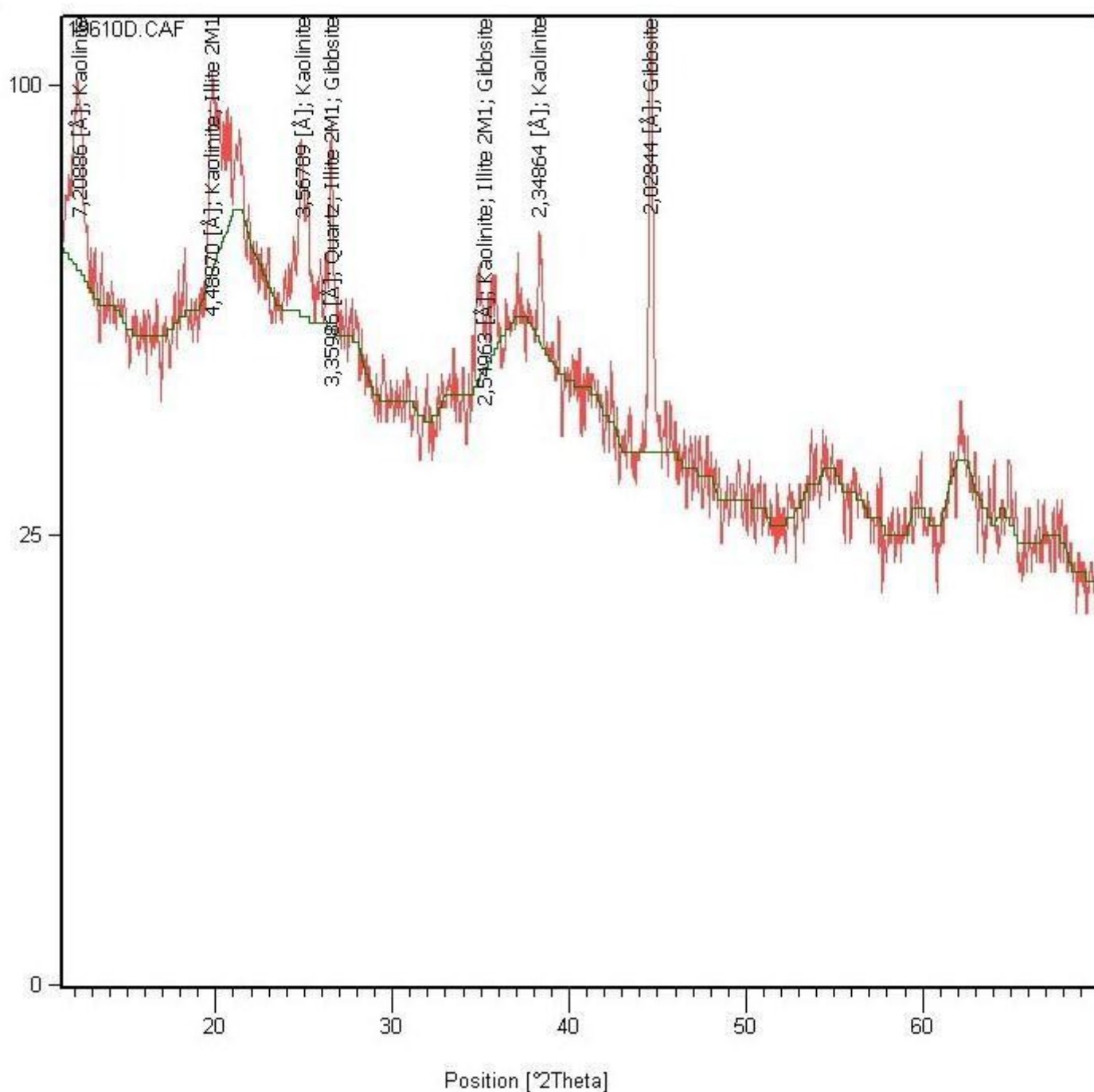


Figura 3 – DRX de LETA

As bandas abaixo dos picos em vermelho correspondem a quantidade de material amoto dos materiais. Como se pode observar o LETA apresenta a maior quantidade de material amorfo, confirmando a análise de FRX, onde apresenta 44,49% de perda ao fogo.

5.1.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV

Através da microscopia eletrônica de varredura foram caracterizadas matérias-primas: cinzas de madeira, lodo de ETA e resíduos da produção de cal .

5.1.4.1 Cinzas de Madeira

A figura 4 mostra a estrutura das cinzas de madeira aqui utilizada.

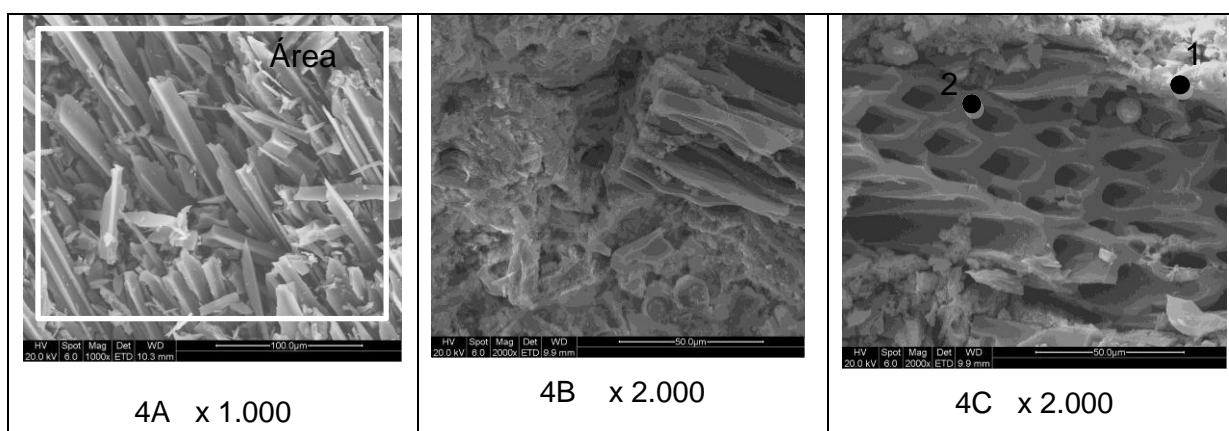


Figura 4 - MEV de partículas de cinzas usada com diferentes ampliações

A morfologia da amostra de CM usada está apresentada (Figura 4) por partículas muito características da anatomia da madeira com conservação parcial (Figura 4C) em formas de canais e paredes mesmo depois de queimada.

A análise de EDS confirma os resultados obtidos na análise de FRX da composição química conforme pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5- Composição química de área e dos pontos de CM (Figura 4-A e 4-B).

Espectros	Teor de elementos, % relativo									
	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	Total
Área	14,67	33,38	7,33	15,90	17,24	3,77	1,54	0,45	5,71	100,00
Ponto 1	17,35	37,13	7,38	12,81	17,21	3,75	0,98	0,68	2,72	100,00
Ponto 2	84,60	12,53	0,52	0,20	0,13	0,73	1,06		0,23	100,00

O pó de CM foi aderido à superfície da fita de cobre e metalizada por uma camada de ouro ultrafina, o que explica o aparecimento dos picos anônimos de cobre e de ouro nos gráficos de EDS. A composição química da área de CM (Figura 4–A) pelo método de EDS apresenta Si, Al e Carbono C (Tabela 5). Mas os pontos diferentes da superfície, apresentam uma diferença muito grande no teor de todos os elementos entre si e da área. Isso significa grande heterogeneidade da composição química de CM a nível microscópico e a ausência de formas visíveis, parecidas às formas cristalinas. Este conclusão confirma os resultados de DRX (Figura 2) sobre a presença na CM de alto teor de materiais amorfos e ausência de significativa quantidade de estruturas cristalinas.

5.1.4.2 Lodo de ETA

As Figuras 5-A e 5-B são imagens bem representativas de LETA, onde é possível verificar um material com as partículas dispersas, formatos irregulares, distribuídas sem estrutura e sem ligação entre elas com poros visíveis de diferentes configurações e tamanhos.

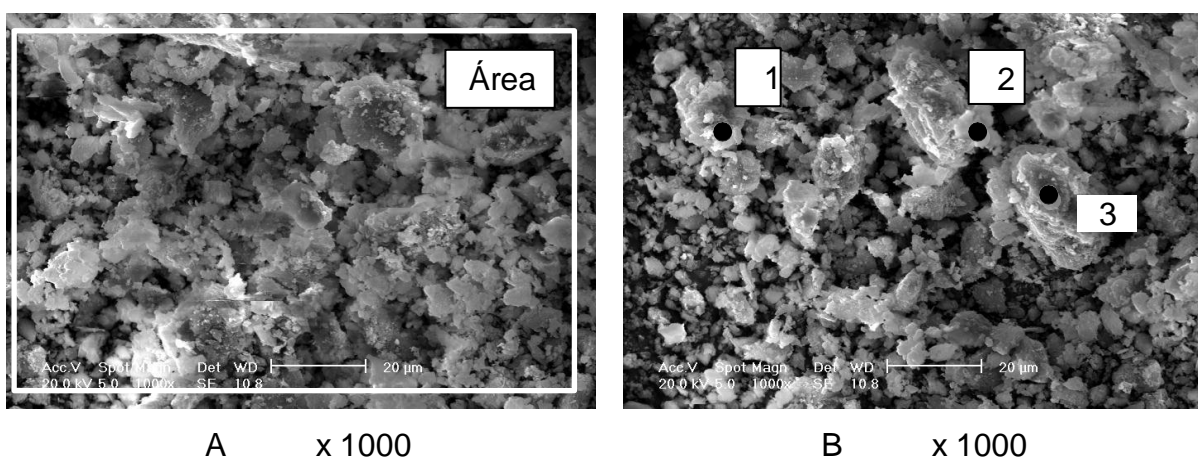


Figura 5 - Micro imagens do LETA através do método de MEV

Através do EDS foi possível determinar a composição química do LETA, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química de área e pontos de LETA de Figura 5-A e 5-B.

Espectros	Teor de elementos, % de peso.				
	O	Al	Si	Mn	Fe
Área	11,9	11,1	8,6	-	6,1
Ponto 1	13,4	16,3	9,3	3,2	11,6
Ponto 2	24,5	24,5	17,0	0,5	12,2
Ponto 3	10,3	14,0	5,6	-	9,7

O pó de lodo de ETA foi aderido à superfície da fita de cobre e metalizada por uma camada ultrafina de ouro, o que explica o aparecimento dos picos de cobre e de ouro nos gráficos de EDS. As análises da composição química de uma área e três pontos da Figura 5 da amostra de lodo de ETA, obtidos através de EDS (Tabela 6) confirmam os resultados de FRX (Tabela 4), que demonstram a alto percentual de Al, Si e Fe se comparados com teores de outros elementos.

5.1.4.3 Resíduo da produção de cal (RPC)

Através de Microscopia Eletrônica de Varredura foi verificada a estrutura de RPC, conforme a Figura 6.

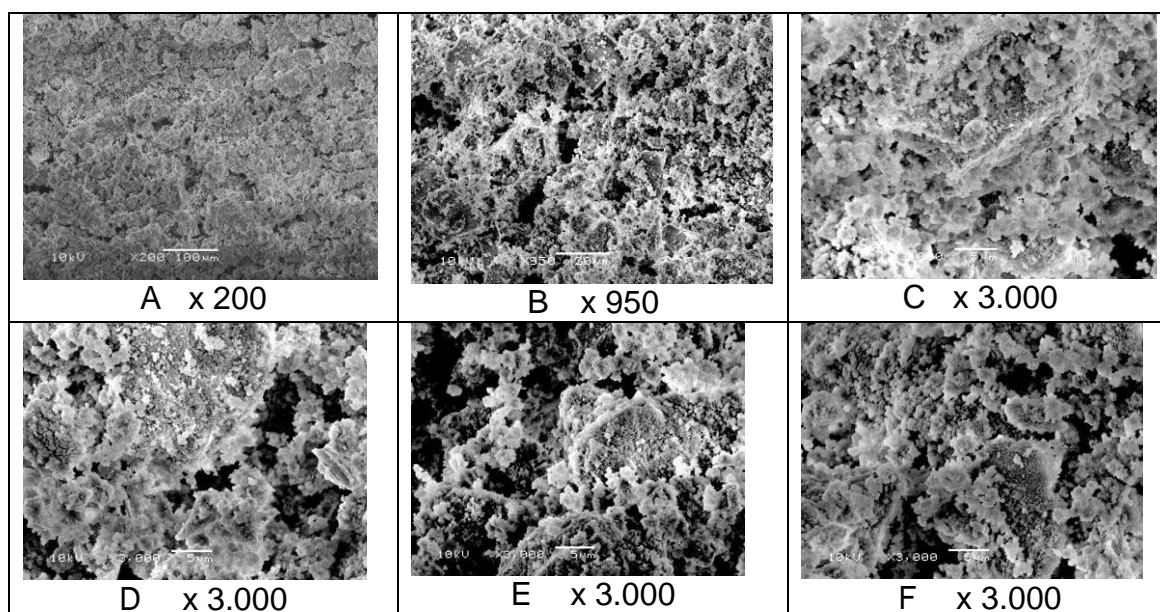


Figura 6 – MEV de resíduo de produção de cal

Na ampliação 200 vezes (Figura 6-A) pode-se verificar que a superfície é bastante lisa, uniforme, sem elevações e rede de poros irregulares; já na ampliação

950x (B) estes poros são mais visíveis e suas formas irregulares. As partículas não possuem formas cristalinas muito visíveis, com extremidades assimétricas.

Estas formas assimétricas são mais visíveis na ampliação 3.000 vezes (Figura 6-F) com todas as formações parecidas com as amorfas.

Provavelmente, por isso nos difratogramas de Raios X da mistura seca não são visíveis os picos de carbonatos. Mas não se pode afirmar com certeza a inexistência de formas microcristalinas internas a estas formações amorfas. A possível explicação para esse fato é que o RPC ficando a céu aberto, é hidratado pelas chuvas e umidade do ar, transformando-se em Ca(OH)_2 e pela ação do CO_2 do ar, transformando-se em CaCO_3 . Porém a sensibilidade do método de DRX (mais ou menos 5%) não permite a identificação dos picos destes minerais, podendo existir muitos mais minerais com estruturas cristalinas (Calcita, Dolomita, Anquerita, etc).

5.1.5 GRANULOMETRIA

A granulometria apresentada pelos componentes é apresentada na Tabela 6.

Tabela 7 - Granulometria do RPC e CM:

PENEIRA		RPC (%)	CINZAS (%)
14 mesh	1,19 mm	0,94	1,37
24 mesh	0,71 mm	33,22	3,17
28 mesh	0,60 mm	24,25	0,75
35 mesh	0,42 mm	24,42	22,65
60 mesh	0,25 mm	10,71	19,59
menor de 60 mesh	menor de 0,25 mm	6,12	52,22
Pó		0,34	0,24

A composição granulométrica demonstra que a maioria das partículas de cinzas é menor que 0,25mm e que no resíduo de produção de cal a maioria das partículas está entre 0,71 mm e 0,42 mm. Embora sejam pequenas, as partículas não foram totalmente destruídas durante o processo de homogeneização dos componentes, podendo ser uma justificativa para os resultados obtidos.



Figura 7 – Corpos de prova fraturados com partículas de cinzas de madeira visíveis.

5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS NOVOS MATERIAIS

5.2.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Os resultados do ensaio de resistência à compressão, corpos de prova secos ao ar, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resistência a compressão axial das composições ao longo do tempo de cura.

N°	Teor de matérias primas, % de peso				Resistência em MPa (médias)					
	Cinzas	Lodo	RPC		3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	60 dias	90 dias
1	30	45	25	média	14,43	12,97	5,78	2,35	8,54	15,38
				desvpad	1,47	1,53	0,61	0,51	0,49	2,51
2	20	55	25	média	9,07	9,33	8,72	6,22	9,13	11,64
				desvpad	0,84	2,67	1,33	3,96	1,84	2,34
3	40	35	25	média	9,71	9,53	10,61	11,98	6,39	8,22
				desvpad	0,54	0,14	2,19	0,44	0,43	1,68
4	35	45	20	média	12,76	7,13	6,34	10,17	11,98	9,66
				desvpad	2,45	1,20	1,16	2,38	1,52	1,97
5	25	55	20	média	9,00	7,12	9,34	5,63	9,69	9,32
				desvpad	1,35	2,47	1,25	3,81	2,03	2,35
6	45	35	20	média	2,87	4,11	7,47	7,45	8,57	8,11
				desvpad	1,08	0,99	1,82	1,58	1,89	1,02
7	40	45	15	média	5,67	9,31	7,95	11,74	8,22	6,66
				desvpad	1,02	0,75	1,43	1,80	0,53	1,55

8	30	55	15	média	10,70	9,47	11,09	3,99	7,81	10,61
				desvpad	1,60	2,35	2,46	1,44	1,49	1,12
9	50	35	15	média	4,86	5,11	6,56	3,87	7,08	4,66
				desvpad	1,50	0,82	1,10	1,28	1,36	1,20
10	35	55	10	média	6,72	7,46	6,05	10,95	11,60	5,47
				desvpad	1,12	0,94	1,28	1,53	2,12	1,21

A análise da resistência uniaxial dos CPs “secos” ao ar demonstra que as composições têm quatro grupos de materiais com diferentes teores de material ligante (RPC): 25, 20, 15 e 10%. Verifica-se que no 28º dia de cura, que serve como referência para as normas, o valor das resistências variou de 2,35 a 11,98 MPa para o primeiro grupo; de 5,63 a 10,17 MPa no segundo grupo; de 6,56 a 11,09 MPa para o terceiro grupo e 6,05 MPa para o último grupo. Os maiores valores das resistências apresentam 20, 25 e 10% de material ligante e 35, 45 e 55% de lodo de ETA respectivamente. Este fato pode ser interpretado como ausência da influência negativa do alto teor de lodo nas resistências dos materiais.

Praticamente todos os materiais têm valores que atendem a NBR 15270 já no 3º dia de cura, mas todos eles sem exceção têm profundas reduções temporárias nos valores das resistências durante o tempo de cura.

Quedas temporárias parecidas nas resistências de composições de escórias siderúrgicas como ligantes de solos naturais para construção de bases de estradas e aeroportos foram observadas e estudadas por MYMRINE (1968 e 1969). A maior razão das quedas, em concordância com os resultados de Mymrine, são as transformações em poros do compósito nas soluções de alta alcalinidade ($\text{pH} = 12,5 - 13$).

Este efeito de sinerese pode ser observado com mais frequência em novas formações amorfas, que foram indicadas neste projeto pelos métodos de DRX, MEV e EDS durante a pesquisa de processos físico-químicos de formação de estrutura de materiais.

Para a fabricação de blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem e com função estrutural, a resistência compressão uniaxial exigida é de 2,0 e 6,0 MPa para 28 dias de cura respectivamente, segundo a NBR 12118/2011 [42]. Já para a NBR 7173/1982 [43], a resistência mínima é de 2,5 MPa.

Todas as composições atendem as especificações de resistência aos blocos vazados de concreto simples sem função estrutural. No entanto, se for com a função estrutural, as composições 6,7 e 9 não atendem no 3° dia de cura; as composições 6 e 7 no 7° dia de cura; as composições 1, 5, 8 e 9 no 28° dia de cura; no 60° dia de cura todas as composições atendem e no 90° dia de cura as composições 9 e 10 não atendem.

A resistência a compressão estipulada pela NBR 15270/2005 para blocos cerâmicos para alvenaria de vedação com furos é maior ou igual a 1,5 MPa e para alvenaria estrutural maior ou igual a 3,0 MPa.

Os resultados obtidos para todas as composições quando secas ao ar foram superiores aos estipulados para os blocos cerâmicos de alvenaria estrutural exceto a composição 2 no 28° dia de cura.

Em função da inconstância nas resistências, nenhum dos tratamentos pode ser encaixado na classificação do concreto, segundo a NBR 8953/1993 [44], onde a menor classificação é C10, com 10 MPa de resistência a compressão axial.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova após absorção de água e o coeficiente de absorção de água, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resistência a compressão axial após absorção de água e coeficiente de absorção de água:

N°	Teor de matérias primas, % de peso				Resistência 28 dias	Coeficiente de absorção de água 28 dias	Resistência 60 dias	Coeficiente de absorção de água 60 dias	Resistência 90 dias	Coeficiente de absorção de água 90 dias
	Cinzas	Lodo	RPC							
1	30	45	25	média	2,34	1,00	7,74	0,91	6,57	0,43
				deasvdp	0,51		2,24		1,59	
2	20	55	25	média	3,28	0,53	6,94	0,76	4,79	0,41
				desvpdp	1,03		0,95		1,03	
3	40	35	25	média	5,58	0,47	5,55	0,87	3,97	0,48
				desvpdp	1,19		1,21		0,48	
4	35	45	20	média	6,60	0,63	5,76	0,48	5,61	0,58
				desvpdp	0,72		1,04		2,34	
5	25	55	20	média	4,34	0,45	4,85	0,41	3,88	0,42
				desvpdp	0,66		1,30		0,13	

6	45	35	20	média	4,09	0,55	4,78	0,56	4,92	0,61
				desvpad	0,78		1,27		0,74	0,51
7	40	45	15	média	5,42	0,46	5,15	0,63	3,43	
				desvpad	0,82		0,24		1,10	
8	30	55	15	média	2,83	0,71	6,54	0,84	5,07	0,48
				desvpad	0,58		1,33		1,28	
9	50	35	15	média	3,20	0,83	4,68	0,66	4,37	0,94
				desvpad	0,41		1,16		0,74	
10	35	55	10	média	6,17	0,56	4,89	0,42	3,50	0,64
				desvpad	0,50		0,26		0,69	

Após a absorção de água, apenas as composições 4 e 10 ficaram acima da resistência exigida para bloco vazado de concreto com função estrutural. Para bloco de alvenaria estrutural apenas as composições 1 e 8 ficaram abaixo do exigido, mas todos são superiores aos blocos cerâmicos para vedação.

Houve uma variação nas resistências ao longo do tempo, isso pode ser justificado pela quantidade de matéria orgânica presente, quanto maior a quantidade de matéria orgânica, menor a estabilidade do material. Outra possibilidade para justificar a variação dos resultados seria a granulometria do material, que durante a homogeneização, a força aplicada não foi suficiente para reduzir ainda mais as partículas.

As mudanças de valores de coeficiente de resistência à água (C_A) durante de hidratação e cura de materiais demonstram mesma instabilidade.

A maioria de materiais tem os valores de C_A menor que 0,65 e só as composições 1, 8 e 9 correspondem a esta demanda no 28° e 60° dias de cura e apenas a composição 9 mantém no 90 dia de cura.

As variações nos valores do coeficiente de resistência à água podem ser justificadas em função do teor de cal virgem ainda não hidratado. No 28° dia de cura o teor de cal virgem deve ser muito maior do que no 60° dia, e durante a imersão completa em água, os processos de hidratação deste cal devem provocar um crescimento na quantidade de novas formações, justificando o valor de C_A igual a 1 encontrado no 28° dia de cura. Esse fato é bastante frequente nas pesquisas do orientador deste projeto.

A tendência da diminuição de valores dos coeficientes de absorção de água durante o processo de hidratação e cura de materiais pode ser explicado por duas razões:

1. A diminuição da porosidade dos materiais através do crescimento de novas formações, responsáveis pelo crescimento das resistências dos materiais durante o tempo de hidratação e cura;
2. A diminuição de teor de cal virgem em RPC com o tempo, durante o processo de hidratação do mesmo, com a síntese de carbonatos de Cálcio e Magnésio.
3. Impossibilidade prática de conseguir uma perfeita homogeneização da mistura, especialmente CM não moída e LETA úmida.

5.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA

O percentual de absorção de água pelos corpos de prova é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - % DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Nº	Teor de matérias primas, % de peso			28 dias		60 dias		90 dias	
	Cinzas	Lodo	RPC	Média (%)	Desvio padrão	Média (%)	Desvio padrão	Média (%)	Desvio padrão
1	30	45	25	18,35	2,30	16,77	0,51	17,52	0,46
2	20	55	25	23,38	1,30	20,99	6,85	18,70	9,22
3	40	35	25	17,04	0,43	17,04	0,43	15,66	0,37
4	35	45	20	16,07	0,85	16,84	0,18	14,51	0,41
5	25	55	20	19,89	2,12	20,05	2,15	16,56	0,79
6	45	35	20	17,84	0,48	15,80	0,11	16,14	0,88
7	40	45	15	16,84	0,63	16,47	0,30	16,23	1,01
8	30	55	15	17,63	0,93	17,50	0,88	16,21	0,72
9	50	35	15	18,45	0,44	15,39	0,50	15,84	0,33
10	35	55	10	18,69	0,53	16,35	0,20	17,37	0,17

O percentual de absorção de água admitido pela NBR 15270/2005 [35;36;37], não deve ser inferior a 8% nem superior a 22%. Observa-se que as composições 2 e 5 não atenderam a essa especificação.

Para blocos vazados de concreto simples para alvenaria, com agregado leve, o percentual de absorção de água é de no máximo 13% como valor médio segundo a NBR 12118/2011 [42]. Para essa finalidade nenhuma composição atendeu a exigência.

Com o passar do tempo, a tendência é a diminuição da absorção de água, pois a interação química é mais intensa, com o aparecimento de novas estruturas mais interligadas.

5.2.3 DILATAÇÃO

Os CPs foram medidos ao longo do tempo de cura. A Tabela 11 apresenta as médias da leitura realizada.

Tabela 11 – Variação do diâmetro dos CPs ao longo do tempo de cura:

Composição		variação %					
		3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	60 dias	90 dias
1	Média	1,19	1,46	1,62	1,17	1,44	1,47
	desvio padrão	1,03	1,00	1,50	0,91	0,94	0,97
2	Média	1,18	1,28	0,18	0,91	1,05	0,57
	desvio padrão	0,74	0,32	0,04	0,47	0,75	0,29
3	Média	1,84	1,75	1,91	1,91	1,84	1,94
	desvio padrão	1,76	1,59	1,43	1,43	1,64	1,82
4	Média	1,47	1,80	1,72	1,68	1,45	1,33
	desvio padrão	1,23	1,65	1,41	1,05	1,32	1,21
5	Média	0,89	1,06	1,62	0,82	0,73	1,07
	desvio padrão	0,60	0,46	1,22	0,48	0,47	0,67
6	Média	2,12	2,00	1,97	1,90	1,83	1,92
	desvio padrão	1,96	1,87	1,63	1,74	1,67	1,72
7	Média	1,84	1,72	1,62	1,47	1,68	1,81
	desvio padrão	1,76	1,60	1,54	1,37	1,53	1,68
8	Média	1,49	1,43	1,43	1,88	1,22	1,05
	desvio padrão	1,19	1,29	1,26	1,80	0,93	0,87
9	Média	2,29	6,84	2,00	2,26	1,91	1,97
	desvio padrão	1,93	0,01	1,89	1,99	1,65	1,76
10	Média	1,88	1,69	1,57	1,33	1,74	1,84
	desvio padrão	1,57	1,13	1,41	0,97	1,20	1,64

A tendência seria a densidade aumentar com o passar do tempo com a matéria amorfa se transformando em novas estruturas, diminuindo os espaços vazios, no entanto pode ser observado que não houve grandes variações no diâmetro dos CPs ao longo do tempo de cura em todos os tratamentos.

5.2.4 DENSIDADE APARENTE

Foi calculada a densidade dos corpos de prova de cada composição. A Tabela 12 demonstra o comportamento das composições ao longo do tempo de cura.

Tabela 12 – Densidade aparente das composições ao longo do tempo de cura

composição		média densidade (g/cm ³)					
		3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	60 dias	90 dias
1	Média	1,596	1,568	1,641	1,615	1,685	1,655
	desvio padrão	0,028	0,045	0,008	0,010	0,019	0,019
2	Média	1,478	1,426	1,449	1,526	1,575	1,547
	desvio padrão	0,046	0,052	0,025	0,071	0,092	0,076
3	Média	1,677	1,675	1,658	1,658	1,650	1,676
	desvio padrão	0,018	0,011	0,017	0,017	0,012	0,006
4	Média	1,677	1,640	1,632	1,666	1,637	1,707
	desvio padrão	0,024	0,009	0,009	0,030	0,013	0,004
5	Média	1,580	1,570	1,595	1,476	1,505	1,639
	desvio padrão	0,043	0,031	0,048	0,061	0,047	0,013
6	Média	1,575	1,620	1,656	1,619	1,681	1,701
	desvio padrão	0,021	0,020	0,013	0,018	0,025	0,011
7	Média	1,599	1,604	1,599	1,648	1,641	1,650
	desvio padrão	0,023	0,040	0,006	0,007	0,008	0,007
8	Média	1,608	1,645	1,626	1,613	1,591	1,641
	desvio padrão	0,034	0,006	0,031	0,011	0,070	0,046
9	Média	1,608	1,645	1,626	1,613	1,591	1,641
	desvio padrão	0,034	0,006	0,031	0,011	0,070	0,046
10	Média	1,606	1,609	1,606	1,566	1,620	1,585
	desvio padrão	0,025	0,016	0,013	0,033	0,020	0,034

O aumento da densidade aparente durante a compactação é uma decorrência da deformação plástica dos grânulos que ao se deformarem passam a ocupar os espaços vazios que havia entre eles. Ao se aumentar a densidade aparente, o volume de espaços vazios entre as partículas por unidade de volume da amostra diminui e, com ele, a mobilidade das partículas. Assim sendo, resta um volume cada vez menor para que água adicionada, possa se movimentar sobre elas [45].

Como a densidade aparente do compacto é dada pela razão entre a massa e o volume do mesmo, e a mesma permanece constante durante a compactação, a

única forma de se aumentar a densidade aparente é através da redução do volume [46].

À medida que o diâmetro do corpo de prova diminui, a tendência é aumentar a densidade do corpo de prova.

5.2.5 PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS DOS NOVOS MATERIAIS

5.2.5.1 DRX – DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

A análise da amostra da composição 1 no 28º dia demonstra a presença dos seguintes minerais: Calcita, Portlandita, Quartzo, Grafite, Periclase e Hexahidrobomite.

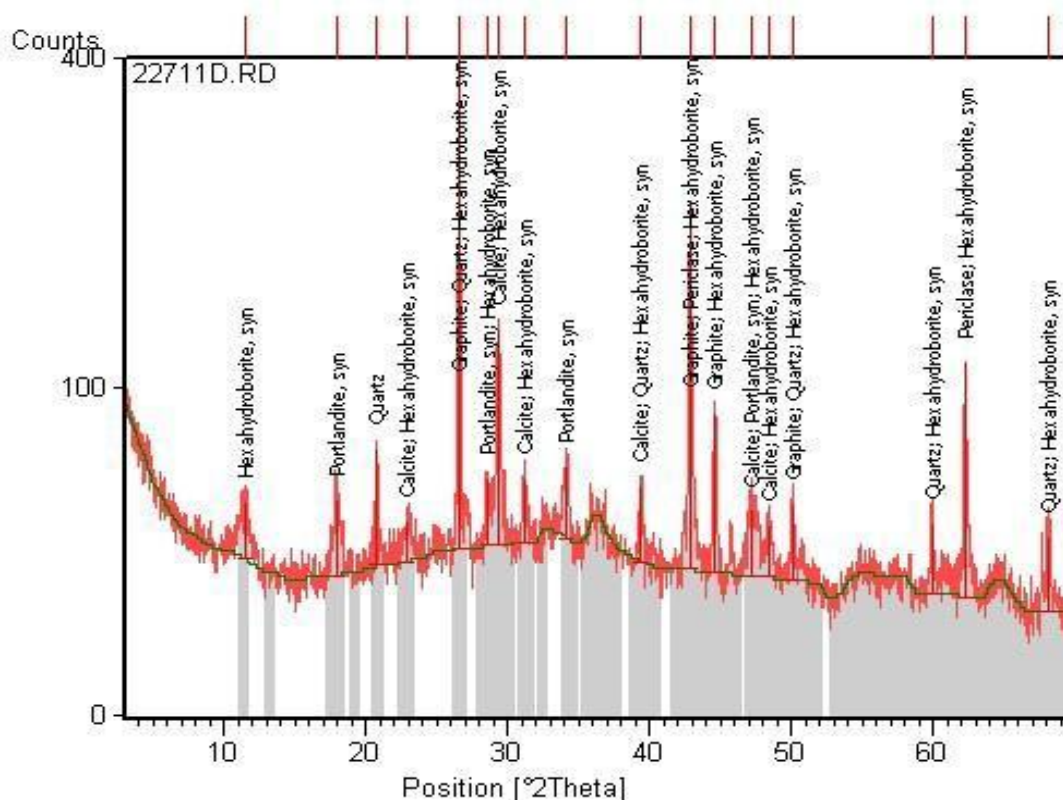


Figura 8 – Difratoograma de DRX da composição 1 no 28º dia.

Tomando por base a linha mais baixa no início da leitura, consegue-se comparar as composições em relação ao tempo de cura, e verifica-se que a composição 4 aos 28 dias de cura apresenta maior teor de substâncias amorfas que a composição 1. Verifica-se que aos 90 dias de cura houve uma diminuição do teor de amorfos, no entanto o fato de apresentar uma maior quantidade de cinzas fez com que a composição 4 aos 90 dias de cura apresentasse uma maior transformação de materiais amorfos em cristais.

5.2.5.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV

Os processos físico-químicos de interação dos componentes usados e dos processos de formação das estruturas de novos materiais foram pesquisados nos componentes 1 e 4 da Tabela 7. Esta escolha teve duas razões:

1. Alto teor de matéria ligante – 25 e 20% do RPC – deve demonstrar os processos pesquisados mais intensivos e por isso mais visíveis, mais indubitáveis;
2. O maior teor em ambas as composições de LETA (45%) podendo demonstrar a influência CM nos processos pesquisados.

Os resultados obtidos através da MEV com EDS para as composições 1 e 4 são apresentados nas Figuras 10 - 17 e Tabelas 13 - 16. A influência do tempo de cura na mudança das estruturas de materiais pode ser observada, comparando imagens das Figuras 10 com 14 no 28º dia de cura e das Figuras 12 com 16 no 90º dia de cura.

Não existe diferença visível entre as morfologias de LETA e RPC (Figuras 2 e 3) para distingui-los nas misturas iniciais ou ainda nas imagens de produtos finais. Por isso a maior informação sobre as mudanças de estrutura morfológicas é obtida pelas partículas de CM, que permite observar a influencia de tempo de cura em meio alcalino do RPC.

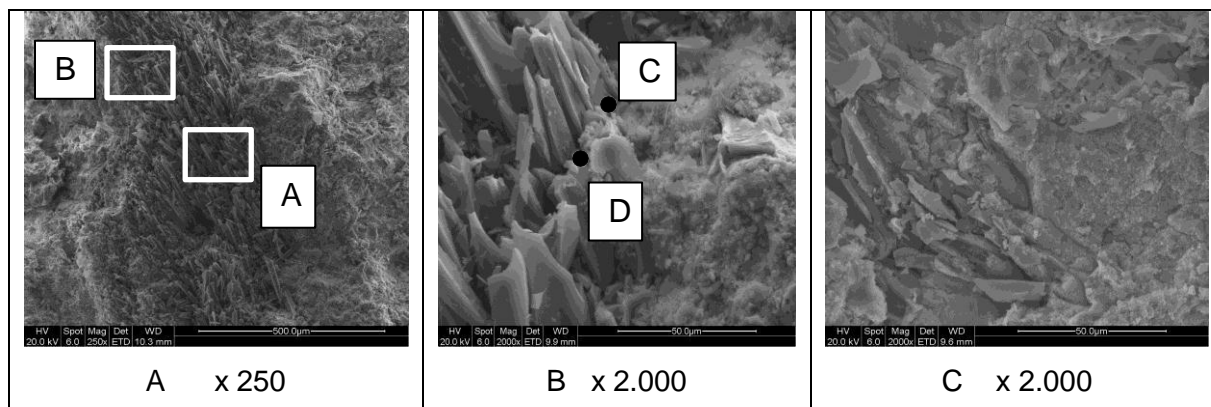


Figura 9 - MEV – imagens de fratura de amostras da composição 1 (Tabela 7) no 28º dia de cura

Na Figura 9-A é possível ver uma linha com partículas de CM de diferentes tamanhos. Na Figura 9-B com ampliação de 2.000 vezes fica mais visível. As partículas de CM estão lisas e parece que elas sofrem destruição mecânica, mas não química. Só na área de contatos com RPC e LETA é possível ver (Figura 9-C) os resultados de corrosão química delas no meio ambiente úmido e alcalino.

Tabela 14- Composição química das áreas e dos pontos da Figura 9 (MEV)

Espectros	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
A –área de cinza	46,5	36,2	1,2	0,8	0,6	1,3	13,1	0,3
B - área de contato	39,0	32,6	4,9	3,5	3,8	1,5	10,2	4,5
C -ponto de contato	33,7	22,7	2,9	3,5	-	-	25,9	11,2
D -ponto de contato	17,7	15,1	6,2	0,3	21,4	2,0	29,4	7,9

A composição química das partículas de CM obtida através de EDS (Tabela 14-A) demonstra alto teor de Carbono C em combinação com usuais componentes de CM – Ca, Mg, Si, Al, K.

A área de contato e interação química de partículas de CM com RPC e LETA (Figura 9-B e Tabela 14-B) demonstra as mudanças de composição química através de diminuição de teor de carbono com aumento de todos outros elementos. Esta combinação pode ser o resultado da interação química nesta área de componentes iniciais com formação de novas substâncias. As análises de dois pontos da área de contato (Figura 9-C e 9-D e Tabela 14-C e 14-D) indicam alta heterogeneidade

química de novas formações por apresentar teor de praticamente todos os elementos.

Os resultados da mesma composição 1 no 90° dia de cura demonstram as maiores mudanças das estruturas do material em todas as ampliações de MEV (Figura 12). As partículas de CM não afetadas pela destruição química são mais raras de serem encontradas. As partículas de CM apresentadas na fotos da Figura 10, estão parcialmente destruídas pela agressividade alcalina com perda de morfologia típica delas.

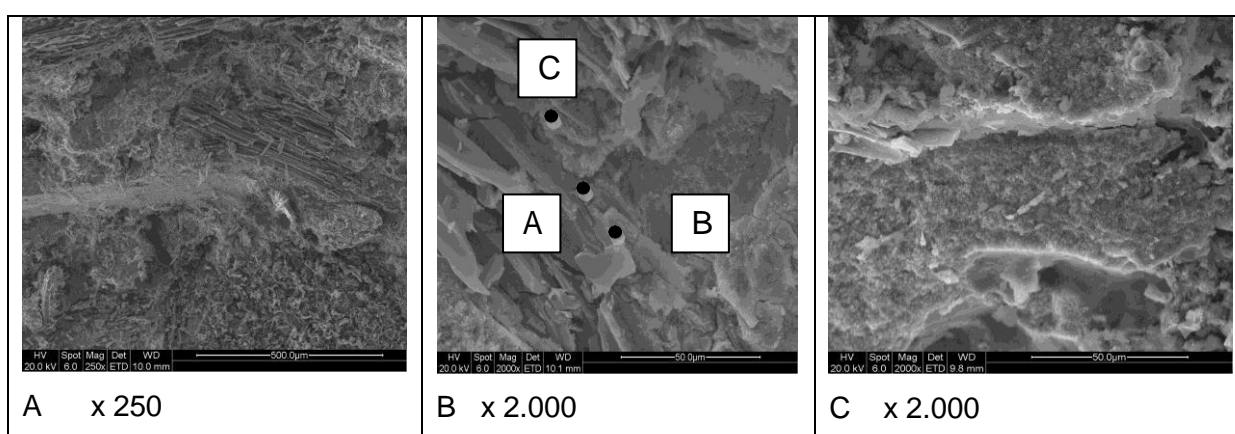


Figura 10 - MEV - imagens de fraturas de amostras da composição 1 (Tabela 7), no 90° dia de cura.

Tabela 15- Composição química das áreas e dos pontos através de EDS.

Espectros	C	O	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe
A - ponto de contato	94,5	0,2	1,0	0,2	-	-	2,1	2,0	-
B - ponto de contato	11,1	16,5	1,0	2,9	3,3	0,2	1,6	56,6	6,6
C - ponto de contato	31,3	16,5	2,9	0,7	25,8	-	0,8	20,1	1,9

O ensaio pelo EDS da composição química (Tabela 15) confirma a extrema heterogeneidade de novas formações, parecido à Tabela 14 ou ainda maior.

O ensaio dos CPs da composição 4 da Tabela 8 pelo métodos de MEV e EDS não oferece grande diferença com os resultados do ensaio da composição 1 porque existe só variação em percentagem dos mesmos componentes iniciais. Na Figura 11-B aparece uma estrutura circular com superfície lisa, que provavelmente pode ser uma partícula de LETA. As composições químicas delas (pontos 1 e 2 da Tabela 15)

têm semelhança justificando tal afirmação. As maiores diferenças no conteúdo foram encontrados para Mg e Ca.

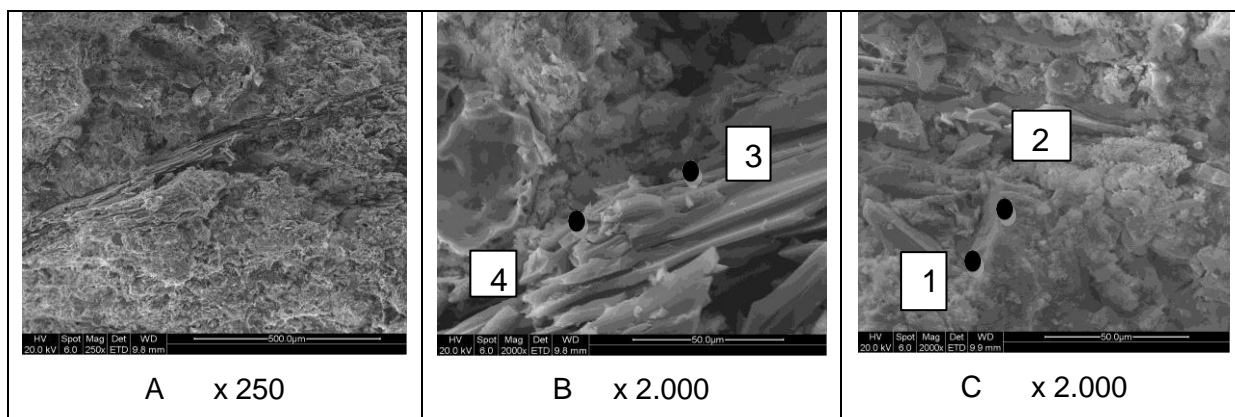


Figura 11 – MEV – Imagens das fraturas das amostra da composição 4 (Tabela 8) no 28º dia de cura.

Tabela 16 - Composição química das áreas e dos pontos através de EDS

Espectros	Composição química, % relativo										
	C	O	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Total
Ponto1	28,9	30,3	8,9	1,8	0,7	-	0,7	27,1	-	1,6	100,0
Ponto 2	28,7	25,9	4,0	2,2	1,3	-	1,6	34,6	-	1,7	100,0
Contato 3	83,8	11,2	0,3	0,1	0,1	0,2	1,8	1,9	0,3	0,3	100,0
Contato 4	63,9	21,9	2,5	1,9	2,3	-	1,7	4,7	0,2	0,9	100,0

As áreas de contato desta partícula com outros componentes demonstram grandes variedades de todos os elementos, como foi com a composição 1 na Tabela 13.

Pesquisando o CP da composição 4 no tempo de cura de 90 dias foi encontrada uma partícula com forma muito parecida a um vaso de barro (pote) com tampa (Figura 12-B e 12-C). Os dois pontos próximos dela (Tabela 17 – A e B) confirmam uma semelhança das composições químicas desta forma, mas com grande diferença da composição química de LETA (Tabela 4).

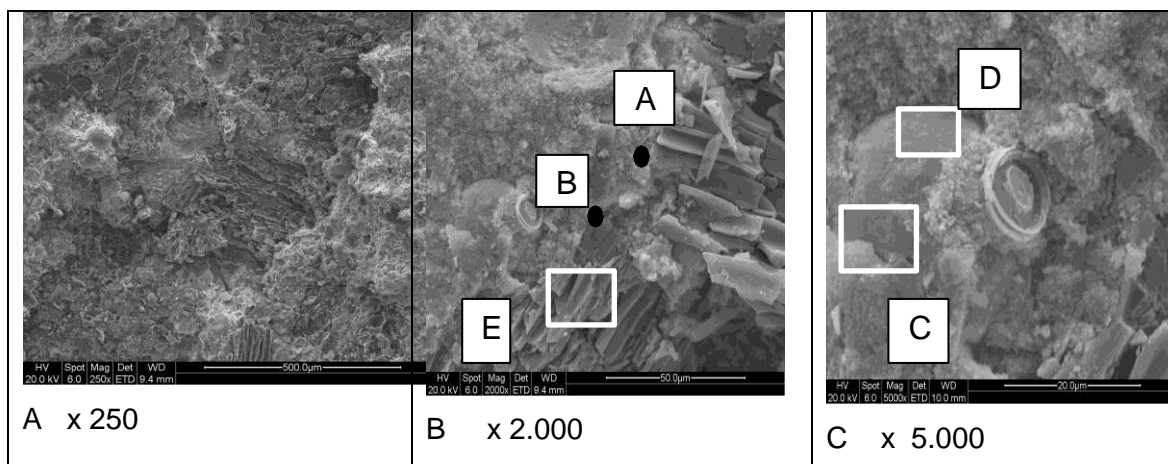


Figura 12 – MEV imagens das fraturas de amostras da composição 4 (Tabela 7) no 90° dia de cura

Tabela 17 - Composição química das áreas e dos pontos através de EDS

Espectros EDS	Teor de elementos, % relativo									Total
	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	
Ponto A	23,5	41,9	5,0	1,4	16,1	1,3	9,6	0,3	0,6	100,0
Ponto B	17,8	43,8	5,4	1,4	19,6	1,1	9,4	0,3	0,7	100,0
Área C	17,4	35,3	16,9	0,9	0,8	0,5	27,0	0,2	0,9	100,0
Área D	16,3	34,6	14,0	3,4	0,8	0,4	29,3	-	0,9	100,0
Área E	32,6	37,5	3,8	0,9	15,3	0,9	7,7	0,3	0,6	100,0

As duas áreas (C e D) da Tabela 17 também têm uma semelhança de composição química, mas estes fatos separados não podem mudar a ausência da homogeneização dos materiais.

6 CONCLUSÕES

1. Cinza de madeira pode ser utilizada em quantidade de até 50% ou mais como matéria prima principal para fabricação de tijolos e blocos em combinação com lodo de estações de tratamento de água e resíduo de produção de cal.
2. Os valores das propriedades mecânicas dos materiais desenvolvidos ultrapassam as exigências da Associação Brasileira de Normas Técnicas. A resistência à pressão uniaxial cresce com aumento de teor de ligante e com tempo de cura. As altas frações mássicas de lodo de estação de tratamento de água (até 55%) praticamente não diminuem as propriedades mecânicas dos novos materiais.
3. Através de conjunto métodos de DRX, MEV e EDS foi determinado que durante a hidratação e cura das misturas ocorreu destruição parcial das partículas de cinza de madeira e de lodo de ETA em meio alcalino de resíduo de produção de cal, com a síntese de novos minerais cristalinos e amorfos, responsáveis pela formação de novas estruturas com propriedades mecânicas acima nomeadas.
4. Entre os objetivos desta pesquisa não foram incluídos os cálculos de eficiência econômica, mas a utilização de resíduos industriais de baixo custo em substituição das matérias-primas naturais tradicionais relativamente caros deve ser lucrativa.
5. A maior importância para a utilização dos resultados obtidos neste trabalho pode ser para o meio ambiente, tendo em vista a real possibilidade de utilização de diversos resíduos industriais como matéria-prima, como forma adequada de destinação final, prevenindo uma possível contaminação do meio ambiente, e minimização da extração de recursos naturais.
6. Como sugestão para trabalhos futuros, mudar a metodologia, moendo as partículas de cinza a fim de verificar o quanto efetivamente influencia o comportamento das composições.

7 REFERÊNCIAS

1. REALI, M. P. **Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETAs.** In: REALI, M. P. (coord.) *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de ETA.* Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 1999. p. 21-39.
2. TALLINI JR, V.M. **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais: lodo de estações de tratamento de água (eta), micro esferas de vidro de jateamento, sais de neutralização de ácidos de baterias e areia de fundição.** Dissertação de mestrado. p.83. PIPE-UFPR, Curitiba, 2009.
3. CORREA, S. M. **Compósito à base de resíduos de concreto e resíduos de produção de cal.** Dissertação de mestrado. PIPE – UFPR, Curitiba, 2005.
4. TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L.M. **Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus Saligna*.** Consulta em 19/11/2011, em http://www.dcf.ufra.br/cerne/artigos/16-02-20093358v2_n1_artigo%2009.pdf
5. LIMA, R. L. S.; SEVERINO, L.S.; ALBUQUERQUE, R. C.; FERREIRA, G.B.; SAMPAIO, L. R.; BELTRÃO, N. E. M. **Capacidade da cinza de madeira e do esterco bovino para neutralizar o alumínio trocável e promover o crescimento da mamoneira.** Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibras., Campina Grande, v.13, n.1, p.9-17, jan/abr. 2009.
6. MORO, L.; GONÇALVES, J. L. M. **Efeitos da "cinza" de biomassa florestal sobre a produtividade de povoamentos puros de *Eucalyptus grandis* e avaliação financeira.** IPEF n.48/49, p.18-27, jan./dez.1995
7. ROCHA, R.; AMPESE, F.; SANTOS, A. P. V.; MISTURA, C. M.; GOBBI, D. L. **Capacidade de adsorção de cinzas de madeira após tratamento hidrotérmico alcalino em diferentes tempos e concentrações.** XVI Encontro de Química d Região Sul , FURB, 13 a 15 de novembro, 2008
8. NAIK, R. RAFAT; KRAUS, R.N.; SIDDIQUE, T; **Uso das cinzas de madeira em materiais à base de cimento.** Referência: CBU-2003-19
9. SOUZA, F. R. de **Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto.** 2009. 209 p. Tese (Doutorado). **Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos,** Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
10. TIMM, P. J.; GOMES, J. C. C.; PERERA, A. F. ;RIBEIRO, S. S.; MORSELLI,T. B.; **Efeito da cinza de madeira na composição química de vermicomposto para uso em sistemas de produção de cebola na Região Sul do RS.**
11. LIMA, S. A. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo de caso da cinza da casca de castanha de caju.** 2008.

139f + apêndices. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008

12. TSUTUYA, M. T.; HIRATA, A. Y. **Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2001, João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABES, 2001. 1 CD-ROM
13. ANDREOLI, C. V. **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final.** Projeto PROSAB. Rio de Janeiro : RiMa, ABES, 2001. 282 p.
14. PORTELLA, K.F.; ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; SALES, A. BARON, O. **Caraterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba – Pr. 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL.** Joinvile, 2003
15. RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodo de Estação de Tratamento de água.** São Paulo, Ed. Edgard Blüchger Ltda., 2001.
16. MARGEM, J. I.; ALEXANDRE, J.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. **CERÂMICA VERMELHA INCORPORADA COM LODO DE ETA.** 17ºCBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
17. YUZHU, W. **Condicionamento de lodo de estação de tratamento de água: estudo de caso.** .Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 419., 1996.
18. SILVA, A. P. da; BIDONE, F. R. A.; MARQUES, D. M. L da M. **Avaliação da Lixiviação de Alumínio e da Produção de Ácidos Graxos Voláteis em Reatores Anaeróbios Utilizados para Estudar a Disposição Final de Lodos de ETAs em Aterros Sanitários.** In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária, XXVII., 2000, Porto Alegre.
19. HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V.A. **Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental.** Revista Cerâmica, n. 51, 2005, p. 85-95
20. TEIXEIRA, S. R., SOUZA, S. A. de, SOUZA, N. R., ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. **Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural.** Revista Cerâmica, 56, p. 215-220, 2006.
21. DIAS, L. M.; BATALIONE, G.; MORAIS, F. U. de; SOBRINHO, J. F.; RIBEIRO, M. C.; LISBOA, M. S. **Alternativa de destinação final do lodo de estação de tratamento de água - fabricação de blocos cerâmicos.** Em <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/dias.pdf>. 2004
22. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, **PERFIL DA CAL.** RT 72. Setembro,

2009.

23. PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 2ª. edição. Editora Globo, 1976.
24. GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª. Ed. – São Paulo: Pini, 2002.
25. CUNHA, J. P. **Desenvolvimento de um novo material a partir da composição dos resíduos da mineração de varvito e da produção de cal**. PIPE – UFPR. Curitiba, 2007. Dissertação de mestrado. p.94
26. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6453: 2003**. Cal virgem para construção civil.
27. AL-SAYED, M. H.; MADANY, I. M.; AL-KHAJA; W. A., DARWISH, A. A. Properties of asphaltic paving mixes containing hydrated lime waste. **Waste Management & Research**, v. 10, p. 183-194, 2004
28. DO, H. S.; MUNA, P. H.; KEUN, R. S. A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime. **Waste Management**, v. 28, p. 191-199, 2007.
29. AL-KHAJA, W. A.; MADANY, I. M.; AL-SAYED, M. H.; DARWISH, A. A. The mechanical and drying shrinkage properties of cement mortars containing carbide lime waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 6, p. 179-190, 2003.
30. KUMAR, S. **Fly ash-lime-phosphogypsum hollow blocks for walls and partitions**. Building and Environment, v. 38, p. 291-295, 2003.
31. CORREA, S. M. **Compósito à base de resíduos de concreto e resíduos de produção de cal**. Dissertação de mestrado. PIPE – UFPR, Curitiba, 2005.
32. CORRÊA, S. M.; MYMRIN, V. A. **New construction material from concrete production and demolition wastes and lime production waste**. Construction and Building Materials, v. 21, p. 578-582, 2005.
33. MORO, L.; GONÇALVES, J. L. M. **Efeitos da "cinza" de biomassa florestal sobre a produtividade de povoamentos puros de *Eucalyptus grandis* e avaliação financeira**. IPEF n.48/49, p.18-27, jan./dez.1995
34. Mymrin V. A., Pininska J., 1978. **Hardening process of blast furnace slags on their geoecological utilization**. Stratto da geologia Applicata e Idrogeologia, v. XIII, pp. 293-298, Bary, Italy.
35. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1**. Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos.2005
36. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2**. Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos.2005
37. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-3**. Blocos

cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio.2005.

38. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 3310-1**. Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico, 1997.
39. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.1994
40. CALLISTER Jr, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**, 5ª. Ed. Editora LTC, 2002.
41. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14974**. Bloco sílico-calcário para alvenaria - Parte 1: Requisitos, dimensões e métodos de ensaio.2003.
42. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118**. Blocos vazados de concreto simples pra alvenaria – Métodos de ensaio. 2001
43. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7173**. Blocos vazados de concreto simples A.1982
44. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**. Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.1992
45. CASAGRANDE, M. N., **Efeito da adição de chamote semi-gresificado no comportamento físico de massa cerâmica para pavimento**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002, p.84. UFSC, Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais.
46. PAULA, G. R. de; QUINTEIRO, E.; BOSCHI, A. O. **Efeito do teor de umidade e da pressão de prensagem sobre as características em revestimentos cerâmicos**. Cerâmica Industrial, 2 (3/4) Maio/Agosto, 1997. p.28-31.